

Вестник Донского государственного технического университета

Теоретический и научно-практический журнал

Vestnik of Don State Technical University

Том 20 | Vol. 20
№ 1 | no. 1
2020 | 2020

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006

1 Механика
Mechanics

2 Машиностроение и машиноведение
Machine Building and Machine Science

3 Информатика, вычислительная техника и управление
Information Technology, Computer Science, and Management

DOI 10.23947/1992-5980

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Т. 20, № 1

Теоретический и научно-практический журнал

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
январь-март 2020 г.

ISSN 1992-5980
eISSN 1992-6006
DOI: 10.23947/1992-5980

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

01.02.01 – Теоретическая механика (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (технические науки)
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки)
01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки)
05.02.02 – Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки)
05.02.04 – Трение и износ в машинах (технические науки)
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
05.02.08 – Технология машиностроения (технические науки)
05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки)
05.13.11 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
05.13.17 – Теоретические основы информатики (технические науки)
05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), а также в международной базе EBSCO
Является членом Directory of Open Access Journals (DOAJ), Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и Cross Ref

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-66004 от 06.06.2016., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 35578

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 26.03.2020., дата выхода в свет 26.03.2020.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать цифровая. Усл. печ. л. 22,6.
Тираж 1000 экз. Заказ № 26/03 Цена свободная.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru http://vestnik.donstu.ru/



СОДЕРЖАНИЕ

ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО
ANNIVERSARY OF THE SCIENTIST



80 лет Заковоротному В. Л. — инженеру, ученому



12 февраля исполнилось 80 лет заслуженному деятелю отечественной науки, доктору технических наук, профессору Вилору Лаврентьевичу Заковоротному.

Вилор Лаврентьевич Заковоротный — известный в России и за рубежом специалист в области нелинейной динамики управляемых систем. Он исследовал управление и динамический мониторинг мехатронных систем и процессов металлообработки, разработал научные основы этого направления, создал научную школу. Результаты его теоретических и опытно-конструкторских работ внедрены в производство на 17 предприятиях России и ближнего зарубежья. В последние пять лет предложенные В. Л. Заковоротным решения для динамического мониторинга процессов обработки на металлорежущих станках и для динамической диагностики роторных систем внедрены в производственную практику ПАО «Роствертол» имени Б. Н. Слюсаря, ООО «КЗ Ростсельмаш», АО «Азовский оптико-механический завод», ВНИИ «Градиент» и др.

В. Л. Заковоротный внес существенный вклад в развитие инженерного образования России, совершенствование учебного процесса, подготовку технических и научных кадров высшей квалификации. Он подготовил более 1500 инженеров, 7 докторов и 42 кандидата наук, которые работают в вузах и на предприятиях Ростовской области. В. Л. Заковоротный стоял у истоков подготовки инженерных кадров по специальностям «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Управление и информатика в технических системах». Он проводит большую работу в Учебно-методическом объединении по автоматизированному машиностроению.

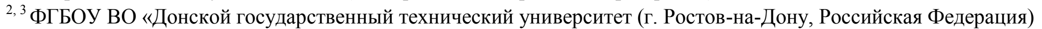
В 1991–2007 годы, являясь проректором по научно-исследовательской работе, профессор В. Л. Заковоротный внес большой вклад в преобразование отраслевого вуза — Ростовского института сельскохозяйственного машиностроения (РИСХМ) в многопрофильный технический университет — ДГТУ.

В. Л. Заковоротный является заместителем председателя диссертационного совета Д.212.058.02 ДГТУ, членом объединенного диссертационного совета ЮФУ, членом редакционных коллегий трех научных журналов, включенных в перечень ВАК РФ.

Профессор В. Л. Заковоротный — автор и соавтор 356 публикаций, в том числе семи монографий, пяти учебников и учебных пособий, 49 патентов и авторских свидетельств.

Выдающиеся заслуги В. Л. Заковоротного отмечены медалью ордена «За заслуги перед Отечеством II степени», званиями лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники, Заслуженного деятеля науки РФ, Почетного профессора и Профессора года ДГТУ. Главком ВВС России наградил В. Л. Заковоротного Памятным знаком за вклад в строительство и развитие ВВС России.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 5–14. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 5–14. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 631.31:681.2.083:631.421 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14

Исследование и моделирование многослойного композитного материала с применением базальтовой ткани



А. Карнуб[1], Д. Б. Нежижимов[2], К. С. Ширинян[3]
[1] Федеральный институт технологии (г. Цюрих, Швейцарская Конфедерация)
[2, 3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Композитные материалы (КМ) все шире используются в различных сферах: машиностроении (в том числе в производстве судов, авиа- и сельскохозяйственной техники), приборостроении, изготовлении емкостей высокого давления и т. д. Довольно часто применяются многослойные композиты, состоящие в основном из одного вида армирующего материала и связующего. Особый интерес представляет использование в одном композите различных видов армирующих материалов — более прочных в местах наибольших напряжений в сечении. В качестве примера можно привести многослойный КМ из стеклянных и базальтовых тканей и волокон с одним видом связующего. Цель исследования — оценить свойства такого материала и смоделировать его методом конечных элементов.
Материалы и методы. В работе использованы компоненты, доступные в свободной продаже. Армирующие материалы — базальтовая ткань БТ-11, стеклоткань ТР-0,5, а также стекломат плотностью 300 г/м^2. Связующее — смола эпоксидная ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамином. Для испытаний на растяжение и изгиб были изготовлены два материала, которые отличались по количеству, виду и последовательности слоев. Для моделирования использовалась система автоматизированного проектирования «Компас 3D» (модуль APM-FEM).
Результаты исследования. В наружных слоях композитного материала используется базальтовая ткань, во внутренних — стеклоткань. Такой подход позволяет повысить предел прочности композита при работе на растяжение и изгиб, однако критическое разрушение ведет к мгновенной потере несущей способности материала. Если же стекломат применяется в качестве сердцевины, то допустимое напряжение ниже (и на разрыв, и на изгиб). Однако при изгибе расслоение материала сокращает его несущую способность до 10% от максимальной. Моделирование материала предполагает некоторые допущения, которые связаны с размером конечных элементов.
Обсуждение и заключения. Применение базальтовых тканей в качестве армирующего вещества позволяет получать изделия со свойствами как стекло-, так и углепластиков. Такой КМ будет незначительно дороже стеклопластика и намного дешевле углепластика. Изделия из композитных материалов (приравненных к изотропным материалам) можно моделировать в системах автоматизированного проектирования методом конечных элементов. Важно учитывать вид нагружения на изделие, поскольку КМ, в основном, обладают анизотропными свойствами (нагрузка прикладывается с учетом направления волокон). В многослойных КМ из конструкционных тканей необходимо направлять нагрузки вдоль волокон. Кроме того, нужно учитывать межслойный сдвиг, различную адгезию между слоями и т. д. Главное допущение данного метода — «постоянство» толщины материала, количества слоев и порядка их расположения.

Ключевые слова: композитный материал, базальтовая ткань, стеклоткань, стекломат, напряжения, метод конечных элементов.

Для цитирования: Карнуб, А. Исследование и моделирование многослойного композитного материала с применением базальтовой ткани / А. Карнуб, Д. Б. Нежижимов, К. С. Ширинян // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 6–15. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14

Research and modeling of a multilayer composite material using basalt fabric

A. Karnoub[1], D. B. Nezhizhimov[2], K. S. Shirinyan[3]
[1] ETH (Zurich, Switzerland)
[2, 3] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The range of use of composite materials (CM) is constantly expanding, finding application in many areas of mechanical engineering, agricultural technology, aircraft manufacturing, instrumentation, shipbuilding, in the manufacture of high-pressure containers, etc. Quite often, multilayer composites consisting mainly of one type of reinforcing material and a binder are used. Of particular interest is the use of various types of reinforcing materials – more durable in the places of maximum stress in the cross section – in a single composite. As an example, we can use glass and basalt fabrics and fibers using one type of binder. The work objective is to study properties of such a material and to model it using the finite element method.
Materials and Methods. The components used are commercially available. BT-11 basalt fabric, TR-0.5 fiberglass, as well as glass mat with a density of 300 g/m^2 were used as reinforcing materials. An epoxy resin of the ED-20 grade with a PEPA hardener was used as a binder. Two types of material were also manufactured for tensile and bending tests, respectively, the differences of which consisted in the number, type and layer sequence. For modeling, CAD COMPASS 3D, APM-FEM module was used.
Results. Basalt fabric is used in the outer layers of the composite material, fiberglass – in the inner layers. This approach provides increasing the tensile strength of the composite during tensile and bending; however, critical failure leads to an instant loss of the bearing capacity of the material. The use of glass mat as the core of the composite material showed lower allowable stresses, both tensile and bending; but in case of bending, it turned out that when the material was delaminated, the load-bearing capacity of the material was about 10% of the maximum. Modeling of the material is possible with some assumptions, in view of the size of the final elements.
Discussion and Conclusions. The use of basalt fabrics as a reinforcing material provides obtaining products with the properties of both glass and carbon plastics. Such a CM will be slightly more expensive than fiberglass and much cheaper than carbon fiber. Products made of composite materials (equivalent to isotropic materials) can be modeled in computer-aided design systems using the finite element method. It is important to consider the type of loading on the product, since CM mainly have anisotropic properties (the load is applied taking into account the direction of fibers). In multilayer CM from structural fabrics, it is necessary to direct the loads along the fibers. In addition, it is necessary to consider the interlayer shear, different adhesion between the layers, etc. The main assumption of this method is the “constancy” of the material thickness, the number of layers and the order of their location.

Keywords: composite material, basalt fabric, fiberglass, glass mat, finite element method.

For citation: A. Karnoub, D. B. Nezhizhimov, K. S. Shirinyan. Research and modeling of a multilayer composite material using basalt fabric. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 5–14. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14

Введение. В работе изучены и смоделированы полимерные композитные материалы (КМ) с армирующим составом на основе базальтовых и стеклянных тканей. В качестве связующего использовалась эпоксидная смола. Исследовались 11- и 13-слойные композиты.

В [1] отмечены технологические и иные особенности КМ, в том числе определяющие распределение нагрузки в слоях. Здесь же рассмотрен принцип «простого» моделирования композитного материала в различных системах автоматизированного проектирования (САПР), а также описано поведение КМ в зависимости от вида нагружения.

Описан метод увеличения сопротивления межслойному сдвигу в полимерных КМ за счет добавления в связующее мелкодисперсных твердых частиц (например, стекла)[1]. Исследован процесс возникновения межслойных напряжений [2]. Вполне возможно, что применение этого способа позволило бы избежать расслоения и повысить допустимые напряжения образцов.

В [3–5] определены объемное содержание связующего, способы его нанесения на армирующий материал, метод укладки, порядок операций и т. д.

[1] Нежижимов Д. Б. Способ увеличения сопротивления межслойному сдвигу в многослойных композитных материалах // Молодежь и наука: шаг к успеху : сб. ст. 3-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2019. С. 84–88.

Известно, что вид деформации и разрушения композитного полимера определяется его формой, качеством и связующим (в том числе его объемным содержанием)[1]. Выведена соответствующая зависимость [6, 7].

В [8–10] описано моделирование детали из КМ с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в САПР.

В представленной работе также использован МКЭ. С его помощью:

— проверена достоверность определения напряжений в местах разрушения образцов и коэффициентов запаса прочности,

— выявлены особенности использования допущений, облегчающих расчет изделий из полимерных КМ, испытанных ранее на разрывных машинах.

В [11] описано влияние формы, вида и типа армирующих компонентов на термические и механические свойства полимерного композиционного материала.

В [12, 13] отмечены возможности применения композитов в машиностроении, автомобилестроении, строительстве и т. д.

Цели исследования:

— обосновать применение базальтовых тканей в полимерных КМ,

— определить их прочностные свойства при различных армирующих компонентах,

— проверить возможности моделирования КМ методом конечных элементов.

Материалы и методы

В работе изучен композитный материал на основе базальтовой и стеклянной ткани и стекломата. В качестве связующего использована эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамином (ПЭПА). Армирующие вещества: стеклоткань ТР-0,5, базальтовая ткань БТ-11 и стекломат плотностью 300 г/м^2. Особенностью эксперимента было применение сразу нескольких видов армирующего материала в одном композите.

Обоснование использования базальтовой ткани и моделирования методом конечных элементов. В настоящее время в КМ редко используется базальтовая ткань, хотя она обладает характеристиками, важными для качественных композитов: высокая ударная вязкость, высокая удельная прочность, жаропрочность, экологическая чистота, высокая стойкость к коррозии и воздействию кислот, низкая теплопроводность, доступная цена, радиопрозрачность и хорошие звукопоглощающие свойства. Также стоит отметить, что базальт — это горная порода, и его запасы практически не ограничены. При производстве базальтового волокна горная порода расплавляется, из нее вытягиваются нити, которые используются для изготовления ткани, ровинга и т. д. По прочности базальтовое волокно превосходит стекловолокно и приближается к углеволокну. Цена базальтового волокна немного выше стекловолокна, однако значительно ниже углеволокна. Это позволяет производить изделия более высокого качества, чем стекловолоконные, но при этом дешевле, чем из углеволокна. Особый интерес представляет использование в одном КМ нескольких армирующих материалов: стекло- и базальтовой ткани, а также стекломата.

При моделировании композитов в САПР необходимо задавать материалам различные характеристики, что создает известные сложности. В рамках данной работы определяется возможность стандартного исследования конструкций методом конечных элементов. Для этого анизотропный материал «приравнивают» к изотропному, и изделия проектируются таким образом, чтобы можно было приложить нагрузки вдоль направления волокон.

Использование конструкционных тканей позволяет с некоторым допущением моделировать поведение КМ. Однако необходимо учитывать вид плетения тканей и угол поворота между слоями. Таким образом, следует получить результаты эксперимента по определению прочностных свойств и выяснить предел прочности при растяжении и изгибе. С учетом этой информации можно смоделировать композит на данные виды нагружения, поскольку материал продолжает разрушаться после повреждения наружного слоя при изгибе и дефектного слоя при растяжении. Если при растяжении в композите нет дефектов, разрушение в основном происходит в опасном сечении.

Подготовка к эксперименту. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из композитного материала (рис. 1).

[1] Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Исследование процесса разрушения слоистого композитного материала // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». Ростов н/Д, 2017. С. 179–181.




а)




б)

Рис. 1. Образцы для испытаний: на изгиб (*а*); на растяжение (*б*)

В первом случае (рис. 1 *а*):
— тип укладки — сэндвич (симметричное расположение слоев во всех образцах),
— указывается общее количество слоев на один образец (сначала наружный, затем средний, затем внутренний),
— 4 слоя базальтовой ткани (БТ),
— 2 слоя стеклоткани (СТ),
— 7 слоев стекломата (СМ).

Во втором случае (рис. 1 *б*):
— 6 слоев базальтовой ткани (БТ),
— 5 слоев стеклоткани (СТ).

В обоих случаях связующее — смола ЭД-20, отвердитель — ПЭПА.

Таким образом, получены два вида материала. Их различия позволяют проверить:
— есть ли смысл использовать ткани вместе с матами,
— какие эффекты даст сочетание различных видов материалов.

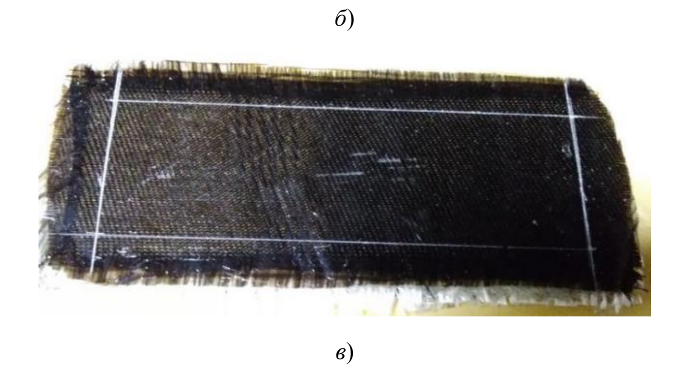
Изготовление образцов. Образцы изготавливались последовательной укладкой слоев тканей (рис. 2 *а*) на основание, обтянутое пленкой, т. к. между смолой и пленками нет адгезии.



а)



б)



в)

Рис. 2. Изготовление образцов: вырезка материала (*а*), удаление излишков смолы (*б*), механическая обработка (*в*)

После укладки всех слоев их нагревали и одновременно разглаживали шпателем через пленку (рис. 2 *б*) — так получилась ровная поверхность без излишков смолы. Схема изготовления:
1) вырезание образцов с запасом на мехобработку,
2) подготовка основания,
3) активация смолы,
4) укладка слоев,
5) разглаживание,
6) фиксация,
7) отверждение,
8) мехобработка (рис. 2 *в*).

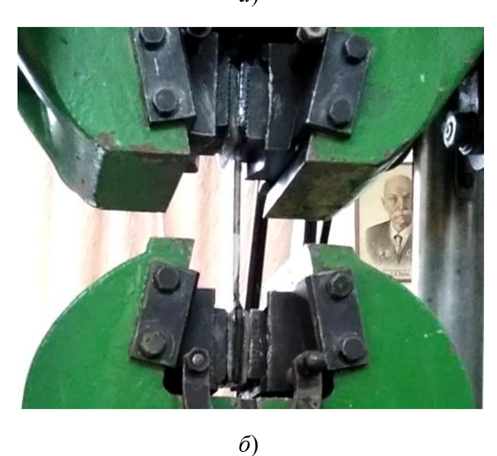
Испытания на растяжение и изгиб. Испытания на растяжение и изгиб производились на разрывной машине (рис. 3–5).



Рис. 3. Разрывная машина




а)



б)

Рис. 4. Испытания: на изгиб (*а*); на разрыв (*б*)



а)




б)

Рис. 5. Результаты разрушения образцов: на растяжение (*а*), на изгиб (*б*)

Результаты исследования

Выводы по испытаниям. По итогам испытаний можно сделать следующий вывод: при сочетании тканей и матов характерной особенностью разрушения является расслаивание на границе различных видов материала (рис. 5). Если же речь идет только о слоях ткани, такой явной особенности не наблюдается. Используемые в качестве армирующего вещества ткани рвутся в месте максимальных напряжений, а затем резко разрушаются. Первоначально разрушаются отдельные волокна, что сопровождается характерным звуком. Затем волокна вытягиваются из матрицы — и разрушается сама матрица. Об этом свидетельствует изменение цвета — место разрушения «белеет» и выглядит более матовым. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

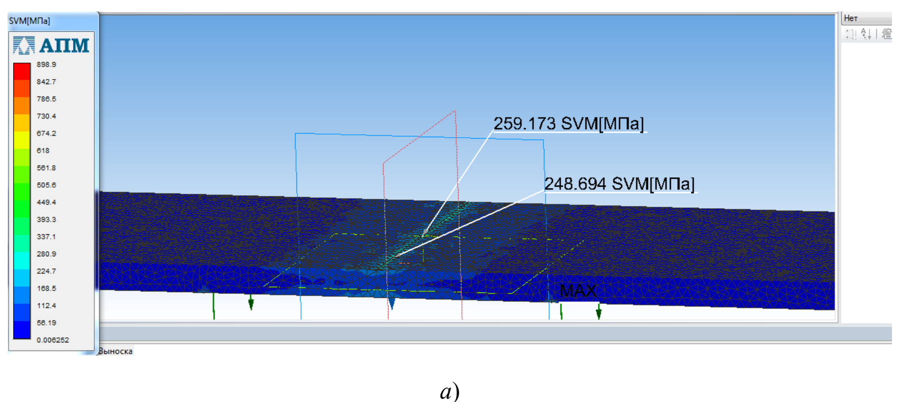
Таблица 1

Характеристики композитных материалов, исследованных на изгиб и разрыв

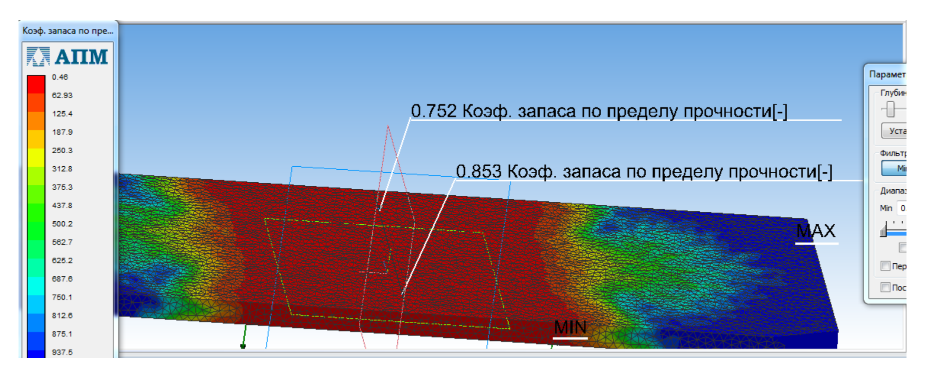
	6БТ5СТ/ЭД-20	4БТ2СТ7СМ/ЭД-20
Макс. усилие при изгибе, кг	500	965
Макс. усилие при разрыве, кг	3560	2600
Макс. напряжение при изгибе, МПа	265,1	239,5
Макс. напряжение при разрыве, МПа	191,8	120
Параметры образца и расстояние между опорами при изгибе, мм*	$b = 64{,}2$; $h = 5{,}5$; $L = 70$	$b = 61{,}7$; $h = 8{,}2$; $L = 70$
Размеры сечения при разрыве, мм	$b = 35$; $h = 5{,}2$	$b = 29{,}5$; $h = 7{,}2$
Плотность, кг/м^3	650	700
*Здесь b — средняя ширина образца, h — средняя толщина образца, L — расстояние между опорами.		

Моделирование композитных материалов и проверка испытаний. Для моделирования выбран материал 6БТ5СТ. Его характеристики внесены в библиотеку «Компас 3D», созданы твердотельные модели. С использованием модуля APM FEM для «Компас 3D» произведены расчеты методом конечных элементов. При этом возникали трудности, обусловленные подбором оптимальных размеров конечных элементов. Для расчетов использованы следующие допущения: места закреплений и приложений нагрузок выполнялись незначительным вытягиванием «полос» шириной 0,1–0,2 мм. На данных участках не стоит учитывать результаты напряжений и коэффициентов запаса прочности, т. к. они некорректны. Такие упрощения позволяют прикладывать нагрузки и устанавливать закрепления в любых местах на моделях. Оптимальный размер сетки — от 2 до 3 мм.

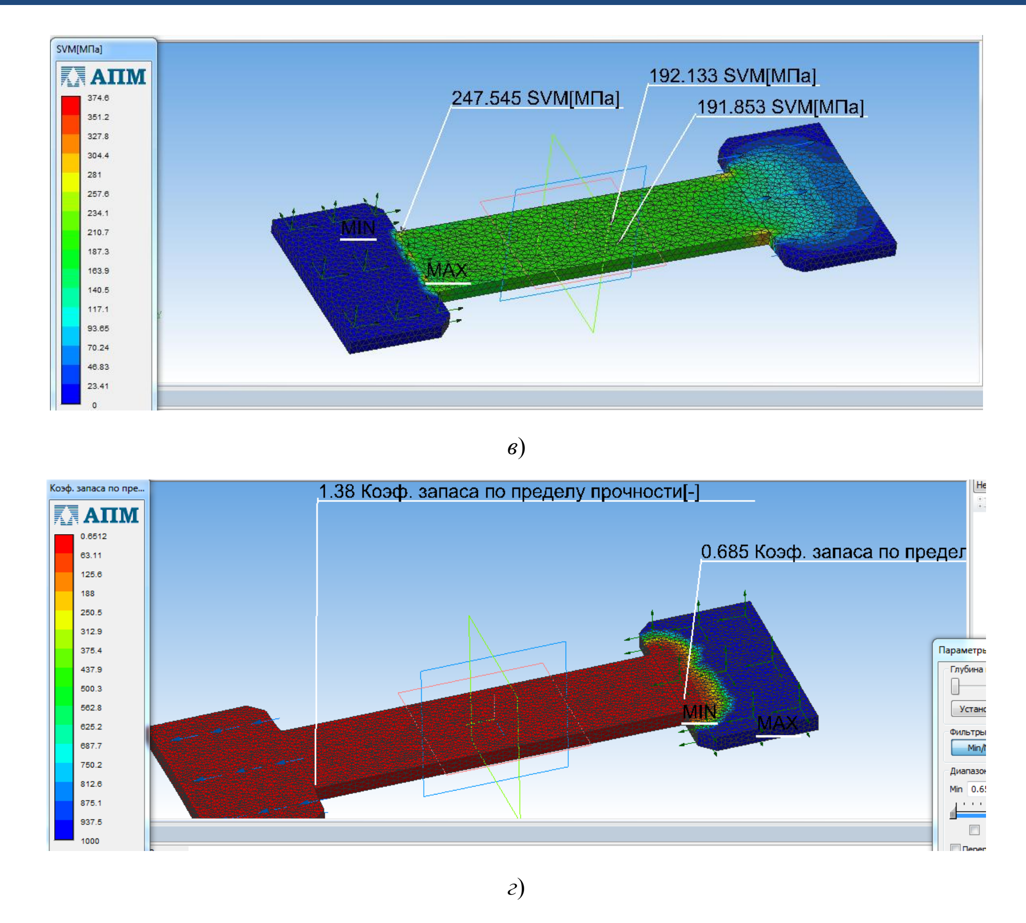
Карты результатов расчетов по напряжениям и коэффициенту запаса предела прочности представлены на рис. 6.



а)



б)



в)

г)

Рис. 6. Карты результатов: по напряжениям (*а*), (*в*); по коэффициенту запаса предела прочности (*б*), (*г*)

Результаты моделирования позволяют утверждать, что настоящие образцы разрушаются в местах, испытывающих максимальные напряжения. Из-за погрешности моделирования коэффициент запаса предела прочности не равен единице, и уменьшение размеров конечных элементов решает эту проблему. Также стоит сказать, что данный метод будет нормально реализован при моделировании конструкций, работающих на растяжение или сжатие, поскольку эти процессы сопровождаются в основном нормальными напряжениями. Однако в ходе испытаний выяснилось, что при различных коэффициентах удлинения у армирующих материалов происходит расслоение вдоль линии нагружения на границе слоев из-за недостаточной межслойной адгезии и высоких касательных напряжений.

Обсуждение и заключения. Применение базальтовых тканей в качестве армирующего вещества позволяет получать изделия со свойствами как стекло-, так и углепластиков. При этом такой КМ будет незначительно дороже стеклопластика и намного дешевле углепластика. Следует отметить хорошие показатели удельной прочности базальта, его абсолютной негорючести, высокой ударной вязкости, стойкости к УФ-излучению. Базальт является диэлектриком, поэтому может использоваться при изготовлении корпусов радиоаппаратуры.

Эксперименты показали более высокие прочностные характеристики тех КМ, в которых больше слоев базальтовой ткани и не применяется стекломат. Использование стекломата в качестве сердечника обусловливает высокие межслойные сдвиговые напряжения, что стимулирует межслойное разрушение и при растяжении, и при изгибе. Максимальные напряжения при изгибе для образца с большим количеством слоев базальтовой ткани составили 261,5 МПа (против 239 МПа с меньшим количеством слоев базальтовой ткани). Кроме того, отмечено явное превосходство по максимальным напряжениям при растяжении — 190 МПа против 120 МПа.

Результаты проведенных расчетов позволяют утверждать, что изделия из композитных материалов (приравненных к изотропным материалам) можно моделировать в САПР методом конечных элементов. Очень важно учитывать вид нагружения на изделие, поскольку КМ, в основном, обладают анизотропными свойствами (нагрузка прикладывается с учетом направления волокон). Так, в многослойных КМ из конструкционных тканей необходимо направлять нагрузки вдоль волокон. Кроме того, нужно учитывать межслойный сдвиг, различную адгезию между слоями и т. д. Главным допущением данного метода является «постоянство» толщины данного материала, количества слоев и порядка их расположения.

Полученные данные и метод нуждаются в дальнейшем исследовании, что позволит создать сортамент композитных материалов с известными характеристиками, моделировать их и выполнять соответствующие расчеты.

Библиографический список

1. Нежижимов, Д. Б. Особенности изделий из композитных материалов / Д. Б. Нежижимов // Актуальные проблемы науки и техники. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 376–377.

2. Антибас, И. Р. Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки / И. Р. Антибас, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 36–42.

3. Антибас, И. Р. Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 67–74.

4. Антибас, И. Р. Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 3 (90). — С. 60–69.

5. Антибас, И. Р. Изготовление теплоизоляционного материала и изучение его теплофизических и механических свойств / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 182–183.

6. Антибас, И. Р. Эффект влажного травления композитного материала из стекловолокна и полиамида на его свойства при изгибе и ударе / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017) : мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону : ДГТУ-Принт, 2017. — С. 26–30. DOI: https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378

7. Kharmanda, G. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 174–176.

8. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2015. — С. 232–235.

9. Антибас, И. Р. Исследование влияния добавок армирующих волокон на некоторые механические свойства перспективных композитных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXII агропром. форума юга России и выставки «Интерагромаш». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 240–244.

10. Антибас, И. Р. Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Мордовского университета. — 2018. — Т. 28, № 3. — С. 366–378.

11. Al-Jeebory, A. A. Effect of Percentage of Fibers Reinforcement on Thermal and Mechanical Properties for Polymeric Composite Material / A. A. Al-Jeebory, A. I. Al-Mosawi, S. A. Abdul Allah // The Iraqi Journal for mechanical and materials Engineering. — 2009, 17–18 May. — Special Issue. — P. 70–82.

12. Vincenzini, P. Advanced Inorganic Fibrous Composites V / P. Vincenzini, M. Singh // Advances in Science and Technology. — 2006. — Vol. 50. — P. 97–106.

13. Dixit, A. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review / A. Dixit, H. S. Mali // Mechanics of Composite Materials. — 2013. — Vol. 49, no. 1. — P. 1–20.

Сдана в редакцию 19.12.2019
Запланирована в номер 03.02.2020

Об авторах

Карнуб Амер, приглашенный исследователь физико-технической лаборатории (отдел материалов) Федерального института технологии (8092, Швейцария, Цюрих, Рэмиштрассе, 101), кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9824-7364, amerkarnoub@gmail.com

Нежижимов Данил Борисович, магистрант кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1036-5746, nezhizhimov96@mail.ru

Ширинян Карен Самвелович, магистрант кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7697-6411, shirinyan.karen@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов

А. Карнуб — научное руководство, корректировка цели и задачи исследования, анализ результатов испытаний, анализ результатов расчетов, доработка текста, корректировка выводов; Д. Б. Нежижимов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, закупка материалов, создание образцов, проведение испытаний, подготовка текста, анализ испытаний и проведение расчетов, формулирование выводов; К. С. Ширинян — консультации при формировании основной концепции, консультации при постановке цели и задачи исследования, проведение испытаний, консультация при расчете.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 15–24. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 15–24. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-15-24

Два способа организации скалярного произведения в методе граничных состояний



Д. А. Иванычев
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк, Российская Федерация)

Введение. Исследуется влияние двух способов организации скалярного произведения на скорость сходимости решения в энергетическом методе граничных состояний. Основу метода исследования составляют пространства внутренних и граничных состояний, которые сопряжены изоморфизмом. Оба пространства ортонормируются, используя то или иное скалярное произведение. Искомое состояние раскладывается в ряд Фурье по элементам ортонормированного базиса, определяются коэффициенты этой линейной комбинации. Различие двух способов заключается в назначении скалярных произведений и вычислении коэффициентов Фурье.
Материалы и методы. Применительно к методу граничных состояний предложена новая теория организации скалярного произведения в пространствах внутренних и граничных состояний. Построены вычислительные алгоритмы ее практической реализации. В традиционном (первом) способе в качестве ортогонализатора в пространстве внутренних состояний используется внутренняя энергия упругого деформирования. Здесь коэффициенты Фурье представляют собой работу заданных сил на базисных векторах перемещения точек границы. В исследуемом (втором) способе скалярные произведения представляют собой интегралы от перекрестных произведений базисных векторов сил на границе. Соответственно коэффициенты Фурье вычисляются как интегралы произведения заданных сил на границе тела на базисные векторы сил.
Результаты исследования. Проведено численное исследование первой основной осесимметричной задачи теории упругости для трансверсально-изотропного цилиндра при отсутствии и при наличии массовых сил. При отсутствии массовых сил анализ упругих полей, полученных при одинаковом числе используемых базисных элементов, показал, что второй способ имеет наибольшую точность результатов. При наличии массовых сил второй способ не показал эффективности в плане единственности решения, однако он вполне пригоден для построения множества упругих полей, используемых в решении более сложных задач.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в решении краевых задач механики не только анизотропного, но и изотропного тела. При решении более сложных задач, таких как контактные и смешенные, вопрос о скорости сходимости требует отдельного исследования.

Ключевые слова: метод граничных состояний, скалярное произведение, внутренняя энергия, пространства состояний, первая основная задача, массовые силы.

***Образец для цитирования**:* Иванычев, Д. А. Два способа организации скалярного произведения в методе граничных состояний / Д. А. Иванычев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С.15−24. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-15-24

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта № 19-41-480003 "р_а".



Two ways of organizing scalar product in the boundary state method

D. A. Ivanychev
Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russian Federation)

Introduction. The influence of two ways of organizing scalar product on the convergence rate of the solution in the energy method of boundary states is considered. The method is based on the spaces of internal and boundary states which are conjugated through isomorphism. Both spaces are orthonormalized using one scalar product or another. The desired

state is expanded in the Fourier series according to the elements of the orthonormalized basis; and the coefficients of this linear combination are determined. The two methods differ in the assignment of scalar products and the calculation of the Fourier coefficients.
Materials and Methods. In relation to the method of boundary states, a new theory of organizing a scalar product in the spaces of internal and boundary states is proposed. Computational algorithms are constructed for its practical implementation. In the traditional (first) approach, the internal energy of elastic deformation is used as an orthogonalizer in the space of internal states. Here, the Fourier coefficients are the work of given forces on the basis vectors of displacement of the boundary points. In the studied (second) approach, scalar products are integrals of the cross products of the basis force vectors at the boundary. Accordingly, the Fourier coefficients are calculated as integrals of the product of the given forces at the body boundary by the basic force vectors.
Results. A numerical study of the first primal axisymmetric problem of the elasticity theory for a transversely isotropic cylinder in the absence and presence of mass forces is conducted. In the absence of mass forces, an analysis of the elastic fields obtained for the same number of used basic elements has shown that the second method has the greatest accuracy of the results. Under solving the problem with the presence of mass forces, the second method did not show efficiency in terms of the uniqueness of the solution; however, it is quite suitable for constructing a multitude of elastic fields used to solve more complex problems.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to solve boundary-value problems of mechanics of not only an anisotropic body, but also an isotropic one. When solving more complex problems, such as contact and mixed ones, the issue of the rate of convergence requires a separate study.

***Keywords**:* boundary state method, scalar product, internal energy, state spaces, the first main task, mass forces.

For citation: D. A. Ivanychev. Two ways of organizing scalar product in the boundary state method. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 15−24. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-15-24

Funding information: The study was carried out with the financial support of RFBR and the Lipetsk Region as part of the research project No. 19-41-480003 "p_a".

Введение. Краевые задачи теории упругости в механике достаточно изучены, поэтому в последние годы проводятся исследования частного направления. Например, рассмотрена осесимметричная первая основная задача для полуполосы [1], решение которой строится в виде разложений по системам функций Фадля-Папковича и имеет явный вид. Предлагается общий метод решения первой основной задачи теории упругости для прямолинейно-анизотропного тела в случае плоской деформации [2]. Используются замкнутые системы краевых задач, схожих с задачами Гильберта, что позволяет добиться большей общности метода. Методом конечных элементов на основе вариационного принципа Кастильяно решены плоские изотропные задачи [3]. Это позволило получить поля напряжений на сетках достаточно низкой размерности, в том числе для несжимаемых материалов. Решаются контактные задачи о внедрении эллиптических штампов в трансверсально-изотропное упругое полупространство [4].

Метод граничных состояний при решении краевых задач для анизотропных тел также нашел свое применение. Например, рассмотрено упругое равновесие трансверсально-изотропного цилиндра под действием осесимметричных поверхностных сил [5]. Исследуются задачи кручения протяженных цилиндров из материала с анизотропией общего вида [6]. Показана математическая модель получения явных параметрических решений для изотропных и анизотропных тел [7, 8], где константы среды в качестве параметров включены в упругие поля. Разработана методика решения задач теории упругости средствами компьютерной алгебры [9]. В решении задач напряженно-деформированной неограниченной упругой среды, содержащей сферические полости или включения, при разных условиях применен метод граничных состояний [10].

В настоящей работе исследуются два подхода к назначению скалярного произведения в «теле» метода граничных состояний. При этом проводится тестирование каждого состояния на примере решения первой основной задачи теории упругости. В каждой задаче удерживается одинаковое число используемых элементов и оценивается уровень погрешности.

Материалы и методы. Метод граничных состояний (МГС) [11] является энергетическим, в нем применяется фундаментальная теория рядов для решения основных задач механики. В качестве опорных используются понятия внутренних и граничных состояний. Внутреннее состояние ξ обусловлено набором вектора перемещений **u**, тензора деформаций ε и тензора напряжений T:

$$\xi = \{u, \varepsilon, T\} . \quad (1)$$

Граничное состояние обусловлено набором вектора перемещений точек границы u^v и усилий **p** на границе тела:

$$\gamma = \{u^v, p\} .$$

Совокупность таких состояний образует базисы пространств внутренних $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, ..., \xi_k, ...\}$ и граничных $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, ..., \gamma_k, ...\}$ состояний. Далее проводится ортогонализация базисов состояний, где в качестве ортогонализатора в базисе граничных состояний используется выражение:

$$(\xi_i, \xi_j) = \int_V \varepsilon_i T_j dV ,$$

в базисе граничных состояний — выражение:

$$(\gamma_i, \gamma_j) = \int_S u_i^v p_j dS . \quad (2)$$

Каждому элементу $\xi_k \in \Xi$ соответствует единственный элемент $\gamma_k \in \Gamma$, причем это соответствие взаимнооднозначное: $\xi_k \leftrightarrow \gamma_k$. Это позволяет отыскание внутреннего состояния свести к построению изоморфного ему граничного состояния. В случае первой основной задачи искомые внутреннее и граничное состояния представляет собой ряд Фурье:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \xi_k \; ; \; \gamma = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \gamma_k , \quad (3)$$

здесь c_k — коэффициенты Фурье:

$$c_k = \int_S p u_k dS , \quad (4)$$

где p — вектор заданных поверхностных сил; u_k — вектор перемещения в *k*-ом базисном элементе базиса внутренних состояний. При этом базисные наборы формируются на основании общего или фундаментального решения задачи.

Первые общие решения уравнения Ламе линейной теории упругости были построены еще в 30-е годы прошлого столетия. Уравнение Ламе — это уравнение движения (в рассматриваемом случае — равновесия) Эйлера:

$$\nabla T + f = 0 ,$$

где T — тензор напряжений; ∇ — оператор Гамильтона, действующий как дивергенция; f — массовые силы.

В уравнении Ламе тензор напряжений T в соответствии с законом Гука представлен через тензор деформаций ε. В свою очередь тензор деформаций в соответствии с соотношением Коши представлен через вектор перемещений u. В общих решениях уравнения Ламе вектор перемещения определяется: в теории изотропной упругости через гармонический вектор B и гармонический скаляр, в теории анизотропной упругости — через функцию напряжений F.

Вектор B (функция F) может быть представлен в виде ряда по базисным векторам $B_k = B_k(\alpha^i)$ — функциям координат α^i. В результате каждому гармоническому базисному вектору B_k (функции F_k) будут поставлены в соответствие следующие базисные элементы:

- вектор перемещения u_k;
- тензор деформаций ε_k;
- тензор напряжений T_k;
- вектор массовых сил f_k (из уравнений равновесия);
- вектор поверхностных сил (из фундаментального соотношения Коши):

$$p_k = nT_k ,$$

где *n* — внешняя единичная нормаль к поверхности тела.

По перечисленным базисным элементам соответствующие векторы или тензоры разлагаются в ряды Фурье с одинаковыми коэффициентами c_k, которые определяются из условий ортогональности базисных функций. Например, для первой основной задачи при отсутствии массовых сил, когда на всей поверхности тела *S* заданы внешние силы p и осуществлена ортогонализация базисных векторов p_k ($\int_S p_i p_j dS = \delta_{ij}$ — дельта Кронекера), коэффициенты c_k определяются из выражения:

$$c_k = \int_S p\, p_k dS\ . \tag{5}$$

Это выражение вытекает из представления:

$$p = \sum_{k=1}^{\infty} c_k p_k\ .$$

Таким образом, исследуется способ формирования решения с помощью выражения для скалярных произведений в базисе граничных состояний:

$$(\gamma_i, \gamma_j) = \int_S p_i p_j dS \tag{6}$$

и выражения для коэффициентов Фурье (5).

В случае второй основной задачи имеют место зависимости:

$$(\gamma_i, \gamma_j) = \int_S u_i^v u_j^v dS\ ;$$

$$c_k = \int_S u\, u_k^v dS\ ,$$

где u — заданный вектор перемещения точек границы тела; u_k^v — вектор перемещения в k-ом базисном элементе базиса граничных состояний.

Результаты исследования. Параметры скорости сходимости рядов и точности результата рассмотрим на примере решения задачи об упругом равновесии трансверсально-изотропного цилиндра из темно-серого алевролита [12] в безразмерном виде (рис. 1).

Граничные условия:

$$p = 0,\ S_1 \big|\ z = -2,\ 0 \le r \le 1\ ;$$

$$p = 0,\ S_2 \big|\ z = 2,\ 0 \le r \le 1\ ;$$

$$p_r = 4 - z^2,\ p_z = 0,\ S_3 \big|\ r = 1,\ -2 \le z \le 2\ .$$

<…>

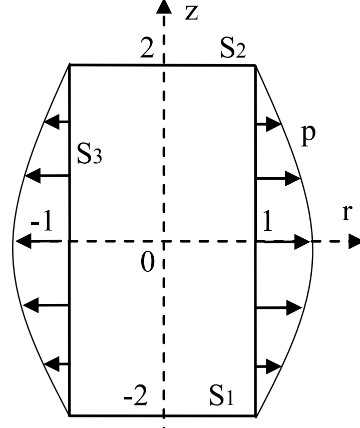


Рис. 1. Граничные условия для транстропного цилиндра

Подробно методика решения первой основной задачи традиционным способом с помощью скалярного произведения (2) приведена в работе [6]. Базис внутренних состояний (1) строится следующим образом:

- используя общее решение задачи о плоской деформации [13], конструируются базисные наборы плоских вспомогательных состояний;
- по формулам перехода определяются базисные наборы пространственных осесимметричных состояний;
- проводится ортонормирование базиса внутренних состояний по матричному алгоритму Грама-Шмидта с использованием скалярного произведения (2);
- из ортонормированного базиса внутренних состояний редуцируется ортонормированный базис граничных состояний;
- вычисляются коэффициенты Фурье (4) и строятся ряды (3) в развернутом виде (индекс k помещен наверх):

$$u_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k u_i^k\ ;\ p_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k p_i^k\ ;\ \sigma_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sigma_{ij}^k\ ;\ \varepsilon_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \varepsilon_{ij}^k\ .$$

Опустим информацию о полях характеристик напряженно-деформированного состояния, полученных при одном и другом способе назначения скалярного произведения, и приведем лишь основные результаты. При этом назовем традиционный подход, используемый в [11], как первый способ решения задачи, а подход, использующий скалярное произведение (6) и коэффициенты Фурье (5), как второй способ. Точность решения при удержании одинакового числа базисных элементов у второго способа выше. На рис. 2 для каждого способа приведено сопоставление полученных граничных условий (ГУ) с заданными при использовании 8-ми значений коэффициента Фурье. Усилия изображены в масштабе, например, истинное значение p_r на первом графике рис. 2 равно значению на графике, умноженному на коэффициент κ .

<…>

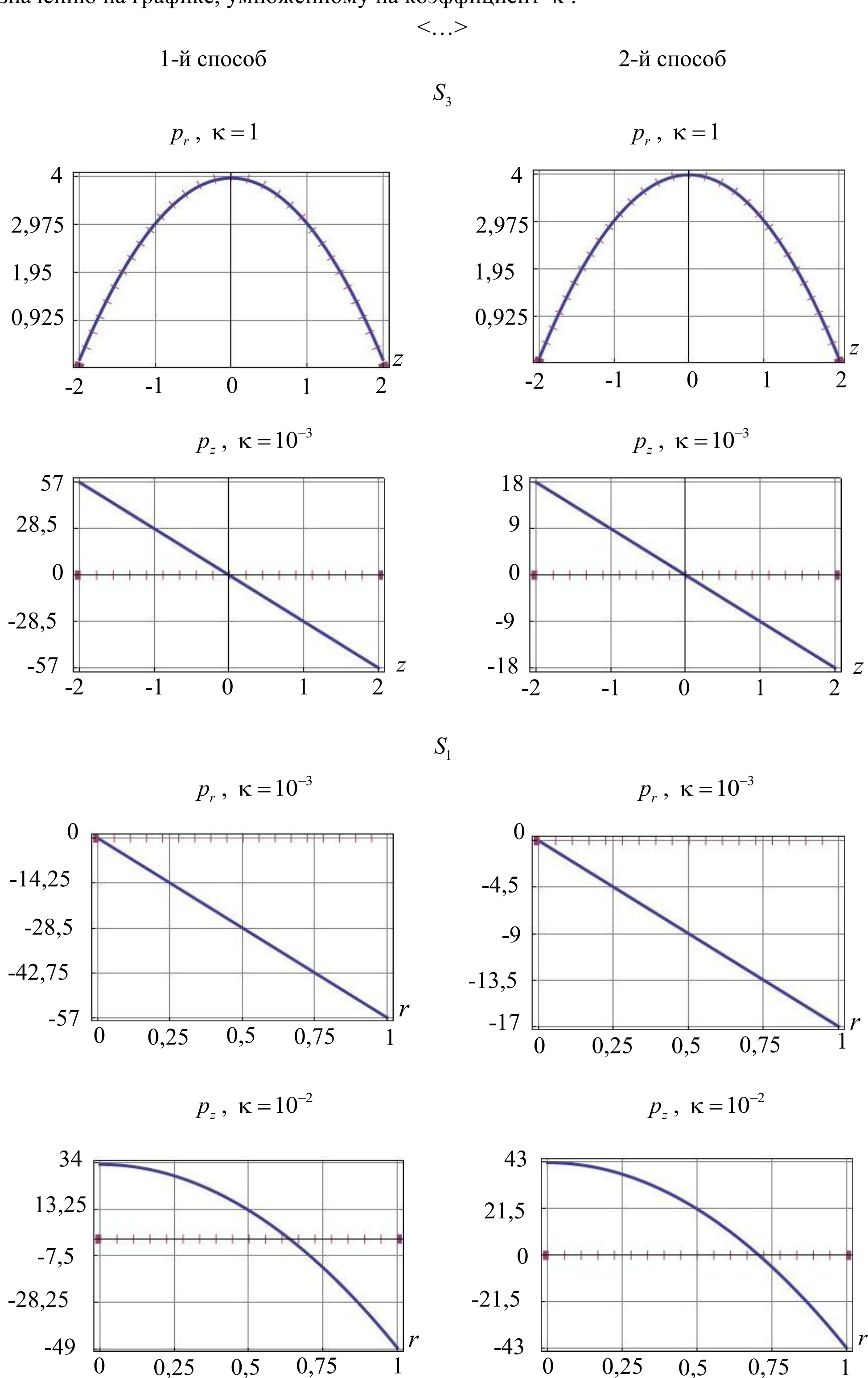


Рис. 2. Верификация ГУ для цилиндра при 8-ми элементах базиса

Эта тенденция сохраняется и при увеличении числа используемых элементов базиса. Для 61-го элемента верификация граничных условий представлена на рис. 3 (приведено сравнение силы p_z на участке границы S_3). Если оценивать погрешность как максимальное отклонение полученной величины от заданной, то во втором способе погрешность меньше.

<…>

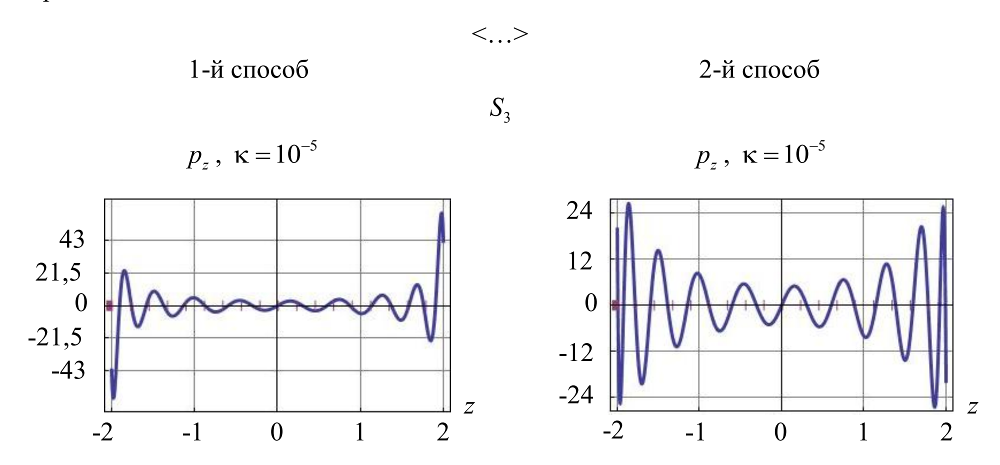


Рис. 3. Верификация ГУ для цилиндра при 61-м элементе базиса

Далее исследуем точность решения для трансверсально-изотропного тела вращения неканонической формы (рис. 4). Граничные условия:

$$p = 0,\ S_1 \cup S_2;$$

$$p_r = 0, p_z = 0,25,\ S_3 \big|\ z = 1,\ 0 \le r \le 1;$$

$$p_r = 0, p_z = -1,\ S_4 \big|\ z = -1,\ 0 \le r \le 0,5.$$

<…>

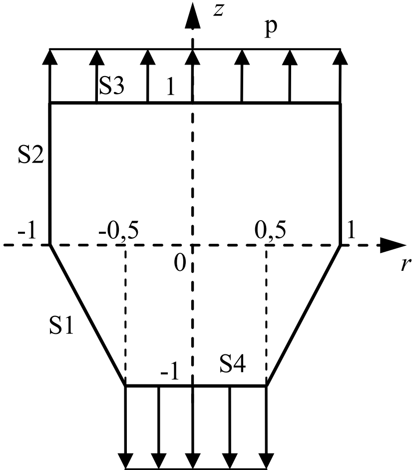


Рис. 4. Граничные условия для тела вращения

Удержано 15 элементов базиса. На рис 5. представлено сравнение граничных условий для каждого способа (показаны не все участки границы и компоненты вектора сил).

<…>

1-й способ 2-й способ

S_4

p_z, $\kappa = 1$ | p_z, $\kappa = 1$

S_3

p_z, $\kappa = 10^{-2}$ | p_z, $\kappa = 10^{-2}$

S_1

p_r, $\kappa = 10^{-2}$ | p_r, $\kappa = 10^{-2}$

Рис. 5. Верификация ГУ для тела вращения

Как видно из графиков, для тела более сложной формы отличие в скорости сходимости наблюдается в пользу второго способа. Рассмотрим задачи с участием массовых сил. Последовательность формирования решения следующая:

1. Задается зависимость вектора перемещения плоского вспомогательного состояния от координат $y^{\alpha}z^{\beta}$ и на его основе определяется вектор перемещения пространственного осесимметричного состояния.

2. Для такого вектора определяются параметры:

- тензор деформаций по соотношению Коши;
- тензор напряжений из закона Гука;
- усилия на поверхности тела из фундаментального соотношения Коши;
- массовые силы из уравнения равновесия.

3. Строится точное частное решение задачи, соответствующее заданной в каждой точке тела функции перемещения.



4. Перебирая $\alpha+\beta \le n$ (n = 1, 2, 3 …), строится множество точных частных решений задачи линейной теории упругости для параметров:

- векторы перемещения u_k;
- тензоры деформаций ε_k;
- тензоры напряжений T_k;
- векторы поверхностных сил $p_k = n \cdot T_k$;
- векторы массовых сил X_k.

5. Формируются базисы пространств внутренних $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, ..., \xi_k, ...\}$ и граничных $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, ..., \gamma_k, ...\}$ состояний, в которых соблюдаются равенства:

$$\xi_k = \{u_k, \varepsilon_k, T_k\},$$

$$\gamma_k = \{u_k^v, p_k, X_k\}.$$

6. Оставляем среди этих решений только линейно независимые и осуществляем их ортогонализацию в соответствии со скалярными произведениями в базисах внутренних и граничных состояний:

$$(\xi_i, \xi_j) = \int_V \varepsilon_{ij}^{(i)} \sigma_{ij}^{(j)} dV,$$

$$(\gamma_i, \gamma_j) = \int_S p_i^{(i)} u_{vi}^{(j)} dS + \int_V X_i^{(i)} u_i^{(j)} dV$$

(индексы *i* и *j*, отвечающие за номера элементов, помещены наверх и заключены в скобки).

7. В результате получаем базис, по которому соответствующие векторы или тензоры разлагаются в ряды (3) с одинаковыми коэффициентами:

$$c_k = \int_V X\, u_k dV + \int_S p\, u_k^v dS,$$

где X — вектор заданных массовых сил.

Исследуем возможность построения упругого поля при наличии массовых сил, используя соотношения (6) и (5). Рассмотрим первую основную задачу с неуравновешенными усилиями для трансверсально-изотропного цилиндра (рис. 6). Граничные условия:

$$p = 0,\ S_1 \cup S_3;$$

$$p_r = 0, p_z = r^2,\ S_3 \big|\ z = 2,\ 0 \le r \le 1.$$

<…>

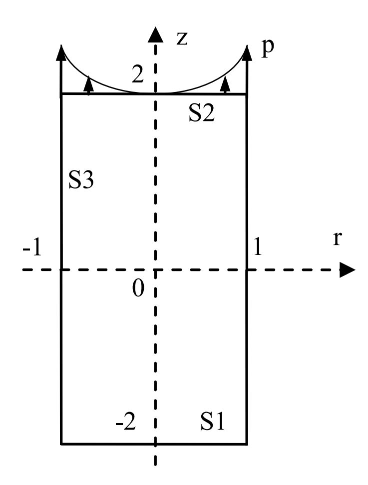


Рис. 6. Граничные условия для цилиндра

Выражения для ортонормированного базисного набора компонент вектора перемещения $u = \{u, w\}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ортонормированный базисный набор компонент вектора перемещения

	u	w
ξ_1	0	$0,1213z$
ξ_2	$0,0788r$	$-0,1126z$
ξ_3	0	$0,0331z^2$
ξ_4	$0,0592rz$	$-0,0268z^2$
ξ_5	$-0,02rz$	$0,0975r^2+0,009z^2$
ξ_6	$0,1535r$	$-0,9163z+0,0691z^3$
ξ_7	$-0,2896r+0,0724rz^2$	$1,2067z-0,1005z^3$
ξ_8	$1,8629r-0,4824rz^2$	$-8,2447z+0,4824r^2z+0,6701z^3$
ξ_9	$0,0908rz$	$-0,0454r^2-0,4347z^2-0,0511z^4$
ξ_{10}	$-0,1757rz+0,0439rz^3$	$-0,0195r^2+0,3661z^2-0,0457z^4$
ξ_{11}	$0,2881rz-0,0804rz^3$	$-0,144r^2-0,7209z^2+0,1206r^2z^2+0,0837z^4$

<…>

Для получения строгого решения потребовалось 11 коэффициентов Фурье, ненулевые значения: $c_1=0,2178$; $c_2=-0,1226$; $c_3=0,2377$; $c_4=-0,0732$; $c_5=0,0247$; $c_8=0,1443$; $c_{11}=0,1443$. Приведем выражения для перемещений и массовых сил (удержано 4 знака после запятой):

$$u=0,2592r+0,0367rz-0,0696rz^2-0,0116rz^3;$$

$$w=-0,0183r^2-1,1497z+0,0696r^2z-0,094z^2+;$$

$$+0,0174r^2z^2+0,0967z^3+0,0121z^4;$$

$$R=-0,2814r-0,1407rz;\ Z=1,2012-0,25r^2-3,6038z-0,9z^2.$$

Если построить базис внутренних состояний через плоские вспомогательные состояния, образованные с помощью монома $z^\alpha y^\beta$, то ортонормированный базис и коэффициенты Фурье изменятся. В этом случае решение окажется тоже строгим и примет вид:

$$u=0,0363r-0,0913rz+0,0309r^3z-0,0287rz^2;$$

$$w=0,0456r^2-0,0077r^4-0,4148z+0,0287r^2z+0,0257z^2+0,0399z^3;$$

$$R=-2,0145r-1,6178rz;\ Z=-0,25r^2-1,4893z.$$

Аналогично можно получить другие частные решения задачи, используя при формировании базиса полиномы разного вида, например, $z^\alpha y^\beta + z^\alpha$ и др.

Исследуемый подход позволяет получить множество решений одной краевой задачи теории упругости при наличии массовых сил. Подвержены перемещения и массовые силы, сочетания которых дают распределение напряжений, удовлетворяющих на границе заданным силам. Первый способ лишен этой особенности, т. к. в нем массовые силы входят в состав заданных условий и задача состоит только в отыскании поля перемещений.

Обсуждение и заключения. Второй способ решения задачи обладает наилучшей сходимостью. Кроме того, в отличие от первого способа при вычислении скалярных произведений в процессе ортогонализации и при определении коэффициентов Фурье, во втором способе не используются деформации и перемещения. Здесь формируется базисный набор напряжений и его след на границе — базисный набор поверхностных сил, с помощью которых проводится ортогонализация и построение рядов. Это означает, что при вычислении скалярных произведений не возникает погрешность, связанная с составляющими, отвечающими за жесткое перемещение, которое может возникать при формировании базиса [11].

Если рассматриваются задачи с массовыми силами, то второй способ может оказаться полезным при формировании множества частных решений, напряжения которых удовлетворяют определенным условиям на границе. Эти решения могут быть использованы в качестве базисных в более сложной задаче, а также быть полезными при определении упругих полей, реализуемых от фиктивных нагрузок, возникающих в результате применения метода Пуанкаре [7, 8].

Проанализирована точность решения задач теории упругости методом граничных состояний при использовании разных подходов в построении скалярных произведений. Решение задачи линейной теории упругости, использующее представление общего решения уравнения Ламе в виде ряда Фурье по базисным функциям и выражение (6) в качестве ортогонализатора этих функций, имело наилучшую сходимость.

Библиографический список

1. Гоголева, О. С. Примеры решения первой основной краевой задачи теории упругости в полуполосе (симметричная задача) / О. С. Гоголева // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2012. — № 9(145). — С. 138–142.

2. Володченков, А. М. Об одном методе решения первой основной задачи теории упругости для однородного анизотропного тела / А. М. Володченков, А. В. Юденков // Universum: Технические науки. — 2015. — № 6(18). — С. 1–9. — URL : http://7universum.com/ru/tech/archive (дата обращения : 07.12. 2019).

3. Суходолова, Ю. С. О конечном элементе на основе вариационного принципа Кастильяно для плоских задач теории упругости / Ю. С. Суходолова, Н. А. Труфанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2012. — № 1. — С. 168–178.

4. Пожарский, Д. А. Сравнение точных решений контактных задач для трансверсально изотропного полупространства / Д. А. Пожарский, Д. Б. Давтян // Вестник Донского государственного технического университета. — 2015. — № 15(1). — С. 23–28. DOI: https://doi.org/10.12737/10371.

5. Иванычев, Д. А. Метод граничных состояний в приложении к осесимметричным задачам для анизотропных тел / Д. А. Иванычев // Вести вузов Черноземья. — 2014. — № 1. — С. 19–26.

6. The method of boundary states in problems of torsion of anisotropic cylinders of finite length / D. A. Ivanychev [et al.] // International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies. — 2019. — Vol. 10, iss. 2. — P. 183–191. DOI: https://doi.org/10.14456/ITJEMAST.2019.18.

7. An algorithm for full parametric solution of problems on the statics of orthotropic plates by the method of boundary states with perturbations / V. B. Penkov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series. — 2018. — Vol. 973, iss. 012015. — 10 p. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/973/1/012015.

8. An algorithm for analytical solution of basic problems featuring elastostatic bodies with cavities and surface flaws / V. B. Penkov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series. — 2018. — Vol. 973, iss. 012016. — 11 p. DOI: https://doi.org/ 10.1088/1742–6596/973/1/012016.

9. Using computer algebra to construct analytical solutions for elastostatic problems / V. B. Penkov [et al.] // Journal of Physics: Conf. Series. — 2019. — Vol. 1203, iss. 012020. — 12 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1203/1/012020.

10. Penkov, V. B. The use of the method of boundary states to analyse an elastic medium with cavities and inclusions / V. B. Penkov, L. V. Satalkina, A. S. Shulmin // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 2014. — Vol. 78, iss. 4. — P. 384–394. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2014.12.010.

11. Пеньков, В. Б. Метод граничных состояний для решения задач линейной механики / В. Б. Пеньков, В. В. Пеньков // Дальневосточный математический журнал. — 2001. — Т. 2, № 2. — С. 115–137.

12. Лехницкий, С. Г. Теория упругости анизотропного тела. / С. Г. Лехницкий. — Москва : Наука, 1977. — 416 с.

13. Александров, А. Я. Пространственные задачи теории упругости / А. Я. Александров, Ю. И. Соловьев. — Москва : Наука, 1978. — 464 с.

Сдана в редакцию 13.01.2020
Запланирована в номер 09.03.2020

Об авторе:

Иванычев Дмитрий Алексеевич, доцент кафедры «Общая механика» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», (398055, РФ, г. Липецк, ул. Московская, 30), кандидат физико-математических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7736-9311, Lsivdmal @mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.754
https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35

Исследование проблем импульсно-дуговой сварки на кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» РИСХМа — ДГТУ



В. А. Ленивкин, Д. В. Рогозин
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. История решения проблемы сварки конструкций из нержавеющих и жаропрочных металлов и сплавов насчитывает несколько десятилетий. Особое внимание исследователей привлекла работа с деформированными алюминиевыми сплавами толщиной 2–6 мм. Как правило, такие тонкостенные конструкции свариваются в среде защитного газа аргона при относительно малых величинах тока, поэтому перенос металла — крупнокапельный (сварной шов формируется в виде отдельных крупных капель с узким проплавлением свариваемых элементов). При этом шов получается очень выпуклым, что не отвечает эксплуатационным требованиям конструкций.

Таким образом, важно было решить следующие задачи: получить управляемый мелкокапельный перенос электродного металла на токах, соответствующих крупнокапельному переносу; определить условие управляемого переноса; разработать систему питания сварочной дуги.

Материалы и методы. Поведение и параметры дуги фиксировались скоростной кино- и видеосъемкой с синхронным осциллографированием электрических параметров процесса — тока и напряжения. Их регистрировали светолучевыми осциллографами и двухэкранными электронными осциллографами. Данные обрабатывались с помощью компьютерного комплекса и программы *Diadem* 10.1.

Результаты исследований. Определено основное условие управляемого переноса металла путем наложения импульсов тока на сварочную дугу от специальных импульсных источников с накопителями и без накопителей электрической энергии. Рассмотрены переходные процессы в электрических цепях основного сварочного источника во время действия импульса тока и паузы. Указаны факторы, обеспечивающие стабильность жесткой и гибкой импульсно-дуговой сварки (ИДС).

Обсуждение и заключения. Итоги изучения возможности управления технологическими свойствами сварочной дуги и предложенные методики расчета параметров режима ИДС стали основой разработки технологии и оборудования для механизированной ИДС плавящимся электродом узлов из алюминиевых сплавов. Они внедрены на предприятиях авиационной промышленности, судостроения. Решения для нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов используются на моторостроительных предприятиях. В результате исследований особенностей процесса механизированной сварки активированной электродной проволокой в углекислом газе разработана технология механизированной ИДС для узлов корпусов электропечей из нержавеющей стали, конструкций дорожно-строительных, сельскохозяйственных машин и судов.

Ключевые слова: сварка в защитных газах, плавящийся электрод, параметры импульсов тока, управляемый перенос металла.

***Для цитирования*:** Ленивкин, В. А. Исследование проблем импульсно-дуговой сварки на кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» РИСХМа — ДГТУ / В. А. Ленивкин, Д. В. Рогозин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 26−36. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35



Study on pulsed-arc welding issues at the Machines and Welding Production Automation Department, RIAE — DSTU

V. A. Lenivkin, D. V. Rogozin
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The history of solving the problem of welding structures made of stainless and heat-resistant metals and alloys goes back several decades. Researchers were particularly interested in working with deformed aluminum alloys 2–6 mm thick. As a rule, such thin-walled structures are welded in an argon shielding gas at relatively small currents; therefore, metal transfer is large-droplet (the weld is shaped in the form of separate large droplets with a narrow penetration of the welding components). At the same time, the weld is very convex, which does not meet the operational requirements of the structures. Thus, it was important to solve the following problems: to obtain a controlled fine-drop transfer of electrode metal at currents corresponding to a large-drop transfer; to determine a condition for the controlled transfer; to develop a power supply system for the welding arc.
Materials and Methods. The behavior and parameters of the arc were recorded through the high-speed film and video shooting with synchronous oscillography of the electrical process parameters – current and voltage. They were recorded by light-beam oscilloscopes and two-screen oscilloscopes. The data were processed using a computer complex and *Diadem* 10.1 software.
Results. The basic condition for the controlled metal transfer is determined through applying current pulses to the welding arc from special pulse sources with and without energy storage devices. Transients in the electrical circuits of the main welding source during the current pulse action and pause are considered. The factors providing stability of rigid and flexible pulsed-arc welding (PAW) are indicated.
Discussion and Conclusions. The results of studying the possibility to control the welding arc processing behavior and the proposed methods for calculating the parameters of the PAW mode became the basis for the development of technology and equipment for the mechanized GMAWP of aluminum alloy assemblies. They are introduced at the enterprises of the aviation industry, shipbuilding. Solutions for stainless and heat-resistant steels and alloys are used at the motor industry enterprises. As a result of studies on the mechanized CO_2 activated electrode wire welding, a mechanized PAW technology was developed for units of stainless steel electric furnace bodies, structures of road-building, agricultural machinery and ships.

Keywords: welding in shielding gases, consumable electrode, current pulse parameters, controlled metal transfer.

For citation: A. Lenivkin, D.V. Rogozin. Study on pulsed-arc welding issues at the Machines and Welding Production Automation Department, RIAE — DSTU. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 25−35. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-25-35

Введение. С начала шестидесятых годов XX века исследовалась сварка в защитных газах металлоконструкций плавящимся электродом [1]. Одна из основных проблем этого процесса — изготовление сварных конструкций из нержавеющих и жаропрочных металлов и сплавов. Особую сложность представляло создание деформированных алюминиевых сплавов толщиной 2–6 мм. Эти материалы применяются в авиации, моторо- и судостроении, в легкой, пищевой, химической промышленности. Сварка тонкостенных конструкций из указанных металлов выполнялась, как правило, неплавящимся электродом в среде защитного газа аргона с относительно низкой производительностью процесса. Применялась также механизированная сварка плавящимся электродом на относительно малых величинах тока, а значит, с крупнокапельным переносом металла. В этом случае сварной шов на малых величинах тока формируется в виде отдельных сплавленных крупных капель с узким, небольшим проплавлением свариваемых элементов, что не всегда отвечает техническим требованиям, предъявляемым к конструкциям.

Было известно, что при сварке в аргоне существует критический ток. В узком диапазоне его изменения резко меняется характер переноса металла. При величинах тока ниже критического перенос металла крупнокапельный, выше критического — струйный. При крупнокапельном переносе металла получается сварной шов неудовлетворительной формы — с узким, неглубоким проплавлением и большой выпуклостью. Если ток выше критического, при струйном переносе металла шов имеет пальцеобразное проплавление, что снижает долговечность сварного соединения.

При механизированной сварке плавящейся электродной проволоки величина тока периодически кратковременно менялась. Цель этой операции — получить управляемый мелкокапельный перенос электродного ме-

талла на токах, соответствующих крупнокапельному переносу. При этом геометрическая форма шва должна отвечать техническим требованиям, предъявляемым к сварным конструкциям.

Материалы и методы

Система питания дуги при импульсно-дуговой сварке (ИДС). Для достижения поставленной цели разработана система питания дуги от двух источников электрической энергии. В систему вошли:

— основной источник питания — сварочный преобразователь ПСГ-500 с пологопадающей вольтамперной характеристикой (ВАХ), так как в то время отсутствовали сварочные выпрямители для механизированной сварки в защитных газах;

— специальный импульсный источник питания (ИИП) — генератор импульсов с накопителем энергии.

Основной и импульсный источник включались параллельно на дуговой промежуток.

В первом разработанном ИИП дуги в качестве силовых управляемых вентилей использованы игнитроны на ток 150 А. Затем, когда стали доступны силовые полупроводниковые вентили ВК-200 и ВТ-150, начали изготавливать и внедрять на предприятиях импульсные источники питания на полупроводниковых вентилях. Импульсные источники питания с накопителем энергии защищены авторскими свидетельствами [1, 2].

При параллельном соединении основного и ИИП дуги [2] в период наложения импульсов тока на дугу подается повышенное напряжение. Оно направлено встречно к направлению основного источника и «запирает» основной источник благодаря наличию в его цепи неуправляемого вентиля *V*2 (рис. 1). Под «запиранием» понимается уменьшение тока в цепи основного источника во время действия импульса тока.

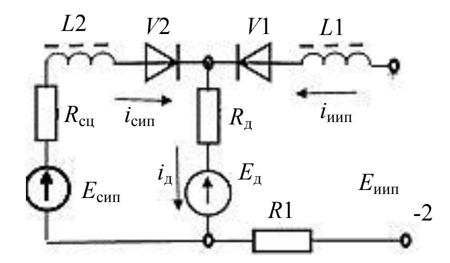


Рис. 1. Эквивалентная схема питания дуги от основного и импульсного источников питания:
$E_{сип}$, $E_{иип}$, $E_д$ — напряжение сварочного, импульсного источников питания и дуги; $i_{сип}$, $i_{иип}$, $i_д$ — ток сварочного, импульсного источников и дуги; $R_{сц}$, $R1$, $R_д$ — активное сопротивление сварочной цепи, импульсного источника и дуги;
$L2$, $L1$ — индуктивность цепей сварочного и импульсного источников;
$V2$, $V1$ — вентили в цепи сварочного и импульсного источников

Однако, несмотря на наличие вентиля *V*2, «запирание» основного источника происходит не мгновенно. Из-за индуктивного сопротивления $L2$ в цепи возникает переходный процесс (во время наложения импульса и после его действия).

Рассмотрим переходный процесс изменения тока в цепи основного источника при наложении импульса тока. Для этого решим линейное дифференциальное уравнение, составленное для цепи основного источника питания (рис. 1):

$$E_c = L_2 \frac{dI_б}{dt} + R_2 I_б + R_д i_{иип}. \qquad (1)$$

Здесь $E_с = E_{сип} - E_д$, $R_2 = R_д + R_{сц}$; $I_б$ — ток основного источника питания; $i_{иип}$ — свободный ток в импульсе (например, для синусоидальных импульсов с затухающей амплитудой):

$$i_{иип} = \frac{E_{иип} - E_д}{\omega_0 L1} \, exp\left(-\frac{R_{иц}}{2L1} t\right) sin\omega_0 t,$$

где $R_{иц} = R_1 + R_д$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L1C} - \frac{R_{иц}^2}{4L1^2}}$.

После окончания действия импульса ток в цепи основного источника возрастает по экспоненциальному закону, определяемому постоянной времени цепи основного источника питания $\tau_{сц} = R_{сц}/L_2$.

$$I_б\,(t)_{t_и \to T_ц} = \left[I_{д0} - I_б\,(t)_{t=t_б}\right]\left(1 - exp - \frac{t}{\tau_{сц}}\right) + I_б\,(t)_{t=t_б}. \qquad (2)$$

На основании уравнений (1) и (2) получен закон изменения тока в цепи основного источника в период наложения импульса тока и после его окончания [3, 4].

[1] Устройство для импульсно-дуговой сварки: А. С. 226752 СССР: МПК H05в 32/04 / Н. М. Будник, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров [и др.]. №1019102/25-27; заявл. 05.07.1965; опубл. [в 1968 г.], Бюл. № 29. 4 с.

[2] Устройство для импульсно-дуговой сварки: А. С. 299111 СССР: МПК B 23к 9/00/ Н. М. Будник, Х. Н. Сагиров, Н. Г. Дюргеров [и др.]. № 1342148/25-27; заявл. 20.06.1969; опубл. 04.01 1971, Бюл. № 1. 4 с.

Методика исследования. Поведение дуги и ее параметры при сварке в различных пространственных положениях образцов из цветных и черных металлов фиксировали скоростной киносъемкой до 5000 кадров/с и видеосъемкой 2000 кадров/с. Одновременно выполнялось синхронное осциллографирование электрических параметров процесса: ток и напряжение дуги регистрировали светолучевым и электронным осциллографами. Данные, полученные с помощью двухэкранного электронного осциллографа, обрабатывались с помощью компьютерного комплекса и программы *Diadem* 10.1.

Исследовали характер переноса металла, формирование сварного шва, определяли физические и технологические параметры процесса ИДС в защитных газах указанных металлов.

Результаты исследования

Сварка в защитной среде аргона. Анализ полученных закономерностей позволяет оценить влияние параметров режима ИДС на совместную работу питающей системы дуги, при которой процесс сварки становится неустойчивым. Осциллограммы процесса ИДС при различных индуктивностях цепей сварочного источника питания показаны на рис. 2.

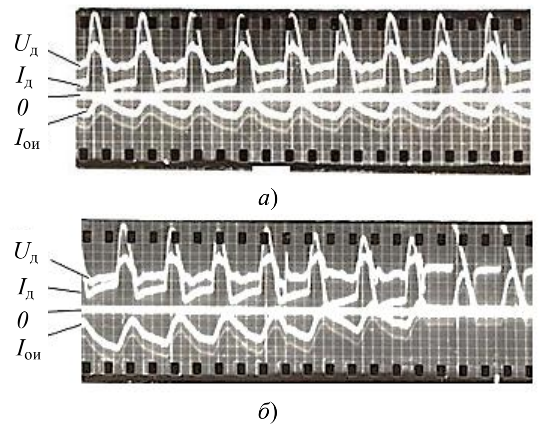


Рис. 2. Осциллограмма тока ($I_д$), напряжения ($U_д$) дуги и тока в цепи сварочного источника питания ($I_{сц}$) ($t_и = 4{,}6 \cdot 10^{-3}$с, $I_и = 690$ А, $f = 100$ имп/с): горение дуги непрерывное $I_{ср} = 70$ А, $L = (1{,}0 \div 1{,}1) \cdot 10^{-3}$ Гн (*а*); горение дуги прерывистое $I_{ср} = 150$ А, $L = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ Гн (*б*)

Рассмотрены естественный (безимпульсный) и импульсный процессы сварки. Установлено, что при одинаковых величинах эффективного тока скорость перемещения капель в дуговом промежутке всегда выше при ИДС. Причем большей скорости перемещения капли всегда соответствует бóльшая величина тока в импульсе в момент ее отрыва от электрода. Отрыв капли от электрода может происходить в различных фазах. Это зависит от режима сварки и параметров импульса тока.

При отрыве капли в конце действия импульсов величина тока близка к величине базового тока процесса сварки, и скорость полета капли достигает 1,2–2,0 м/с. В этом случае обеспечивается управляемый направленный перенос металла при сварке во всех пространственных положениях с минимальными потерями металла на разбрызгивание (рис. 3 а).

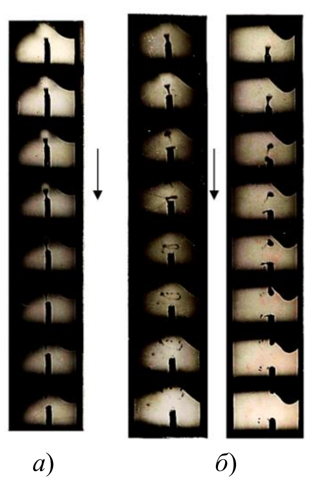


Рис. 3. Кинограммы ИДС алюминиевого сплава АМг6 в потолочном положении при различных режимах (скорость съемки 4000 кадров/с, сварочная проволока АМг61 диаметром 1,6 мм): эффективный ток $I_{эф}$= 100 А, $t_и = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ с, $I_и = 310$ А, $f = 50$ имп/с (*а*); $I_{эф} = 180$ А, $t_и = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ с, $I_и = 500$ А, $f = 50$ имп/с (*б*)

Установлено, что минимальная амплитуда импульса тока $I_{\text{п}\,min}$, которая обеспечивает переход от неуправляемого переноса к управляемому, зависит от:

— поверхностного натяжения электродного металла $\sigma_{\text{п}}$,

— диаметра электрода $d_э$,

— параметров режима сварки, $I_{\text{эф}}$, $v_{\text{п}}$:

$$I^2_{\text{п}\,min} t_{\text{и}} = A_1 \sigma_{\text{п}} d_э^2 f^{0,5} / I_{\text{с}}. \quad (3)$$

В случае отрыва капли от электрода при амплитудной величине тока импульса скорость ее полета в дуговом промежутке может превышать 8 м/с. Это приводит к появлению:

— околошовных выплесков (за счет разбрызгивания жидкого металла из сварочной ванны),

— околошовной зоны напыления мелких капель, образующихся при разрыве шейки жидкого металла между электродом и каплей (рис. 3 *б*).

Для уменьшения потерь металла на разбрызгивание амплитуда импульса тока не должна превышать 1,1 $I_{\text{п}\,min}$.

Увеличение $I_{\text{п}}$ ограничено условием непрерывности горения дуги: если эффективный ток постоянен, то при увеличении амплитуды, частоты и длительности импульсов базовый ток уменьшается.

При уменьшении величины базового тока ниже минимального тока устойчивого горения дуги возникают ее обрывы (прерывается сварочный ток), нарушается стабильность процесса сварки (рис. 2 *б*). Это условие было использовано для определения максимальных величин параметров импульсов. Например, максимальная амплитуда импульса от источника с накопителем энергии для униполярных импульсов тока (затухающая синусоида):

$$I_{\text{п}max} < \frac{2I_c}{\pi t_{\text{ц}} f^{0,5}} \sqrt{(\pi^2 t_{\text{ц}}^2 + t_{\text{и}})} \Big/ \sqrt{t_{\text{ц}} \left(1 - exp\left(\frac{2t_{\text{и}}}{RC}\right)\right)}. \quad (4)$$

На рис. 4 показаны зависимости минимально необходимой амплитуды тока импульса (кривые 1, 1') и максимально допустимой амплитуды (кривые 2, 2') от частоты их следования при различной длительности импульсов. Кривые 1, 1' (при увеличении тока) являются границей перехода от неуправляемого переноса капель металла к управляемому переносу. Кривые 2, 2' — граница перехода от управляемого переноса капель к перерывам в горении дуги. Указанные кривые ограничивают область режимов ИДС плавящимся электродом.

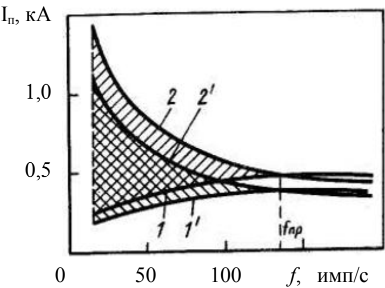


Рис. 4. Области допустимых амплитудных величин импульсов тока:
аргон, сплав АМг6, $I_{\text{эф}}$ = 140 А; 1, 2 — $t_и$ = 1,4 мс; 1', 2' — $t_и$ = 2,2 мс

Из уравнений (3) и (4) следует, что с увеличением частоты следования импульсов минимально необходимая амплитуда тока возрастает, а максимально допустимая амплитуда уменьшается. Область управляемого переноса капель сужается.

Под предельной частотой следования импульсов тока ($f_{\text{пр}}$) принята такая частота, при которой минимально необходимая амплитуда импульса тока равна максимально допустимой. Эту частоту определили решением уравнений, описывающих $I_{\text{п}\,min}$ (3) и $I_{\text{п}max}$ (4).

Сварка в активных защитных газах. Рассмотрена сварка в активных защитных газах (CO_2, N_2 и смеси Ar < 80 % + CO_2 > 20 %) и *He* на токе прямой и обратной полярности. Установлено, что в этом случае наложение импульсов тока с параметрами, применяемыми для сварки в аргоне, не обеспечивает управляемый перенос металла [4, 5]. Наложение импульсов тока при сварке активированной электродной проволокой (солями щелочной группы) током прямой полярности приводит к стабилизации дуги — она принимает форму, соответствующую току выше критического. Однако в промежутках между импульсами, когда ток дуги меньше критического, она интенсивно блуждает. Если капля переходит с электрода в конце действия импульса, когда ток снижается до величины ниже критической, то отрыв и перенос капли проходит в условиях блуждающей дуги. В промежутках между импульсами плавится электродная проволока, и на ее конце всегда имеется некоторый объем расплавленного металла. Вследствие блуждания дуги капля смещается относительно оси электродной

проволоки. При наложении импульса капля срывается и может не попадать в сварочную ванну. Наложение импульсов тока длительностью 1,2–1,8 мс приводит к отрыву капель с электродной проволоки каждым импульсом тока, однако не обеспечивает направленного переноса металла в сварочную ванну и характеризуется повышенным разбрызгиванием.

Установлено, что несоосные капли при наложении импульсов тока в большей мере отклоняются от оси электродной проволоки, чем соосные. Наибольшее количество несоосных капель отрываются от электрода под углом 20–30^{o} и не попадают в сварочную ванну. Соосные капли отрываются под углом, не превышающим 10^{o}.

При длительности импульсов 4,0–5,0 мс, вследствие интегрального саморегулирования плавления электрода, снижается базовый ток процесса сварки [6, 7]. На конце электродной проволоки, несмотря на блуждание дуги во время паузы, образуется небольшой объем расплавленного металла. Во время действия импульса тока образуется, как правило, несколько соосных капель, которые переносятся в сварочную ванну, что обуславливает малое разбрызгивание.

Для уменьшения потерь металла на разбрызгивание при сварке активированным электродом в активных защитных газах и их смесях необходимо совмещать процессы плавления и переноса капель в сварочную ванну. Электродная проволока должна плавиться при токе выше критического, когда дуга пространственно устойчивая и не вызывает отклонения траектории полета капель от оси электрода в межэлектродном промежутке [8, 9]. Это достигается следующим образом: на непрерывно горящую дугу накладываются импульсы тока той же полярности с минимально возможной амплитудой $I_п = (1,5–2,0)\ I_{кр}$ и максимально возможной длительностью $t_и$ = 4,0–10 мс при частоте следования импульсов соответственно 100–50 имп/с. Базовый ток выбирается минимальным (чтобы во время паузы электродная проволока практически не плавилась). В этом случае в период действия импульса происходит кратковременный струйный перенос металла (СПМ), названный прерывисто-струйным (ПСПМ). При снижении амплитуды импульсов ниже 1,5 $I_{кр}$ струйный перенос металла невозможен.

Импульсный источник питания без накопления энергии был разработан и изготовлен для практического осуществления описанного процесса.

Впервые были определены особенности формирования шва при ИДС. Исследовался характер перемещения жидкого металла в сварочной ванне с наложением и без наложения импульсов тока на дугу. Это позволило выявить факторы, улучшающие формирование шва и удержание металла сварочной ванны при ИДС в различных пространственных положениях.

С помощью скоростной киносъемки (до 5000 кадров в секунду) установлено, что при ИДС жидкий металл из головной части сварочной ванны вытесняется под действием давления дуги и давления, создаваемого каплями переносимого электродного металла [3]. Оказались соизмеримыми скорости перемещения жидкого металла, вызванного давлением дуги за время действия импульса тока и кинетической энергией капель. Поэтому при ИДС за один цикл жидкий металл дважды вытесняется из головной части ванны в хвостовую часть.

С увеличением частоты импульсов при прочих равных условиях (постоянство сварочного тока и напряжения дуги) возрастает частота перемещения жидкого металла в ванне. При этом сокращается время цикла и уменьшается количество перемещаемого металла, который кристаллизуется более тонким слоем, что способствует улучшению первичной кристаллизации металла шва.

ИДС при питании дуги от двух источников (рис. 1), как правило, выполняется по жесткой программе с фиксированной частотой следования импульсов. Форма импульсов тока аналогична кривой поданного повышенного напряжения (рис. 2).

С 1989 года проводятся научно-исследовательские работы по созданию сварочных выпрямителей с инверторными преобразователями для различных способов сварки плавящимся и неплавящимся электродами[1, 2].

ИДС импульсами прямоугольной формы. Сварочные выпрямители с инверторным преобразователем создаются на базе высокочастотных инверторов с частотой преобразования тока от 16 кГц. Источники питания сварочной дуги в этом случае малоинерционные — быстродействующие. Это позволяет получать кривую сварочного тока различной формы с изменением величины в широком диапазоне. Наибольшее применение при выполнении сварочных работ находят выпрямители с комбинированными вольтамперными статическими характеристиками с тремя ярко выраженными участками. Крутопадающий участок при токах менее 30 А обеспечивает надежное зажигание дуги и установление процесса сварки. Пологопадающий участок и штыковой участок в диапазоне рабочих режимов обеспечивают стабилизацию сварочного тока в широком диапазоне его регулирования, в широкой области изменения падения напряжения на дуге.

[1] Способ дуговой сварки плавлением: А. С. 1776517 СССР: МПК В23 К 9/167, 9/173 / В. А. Ленивкин, П. И. Петров, А. Г. Олейников. № 4913972/08; заявл. 25.09.91; опубл. 23.11.92, Бюл. № 43. 5 с.
[2] Источник питания для дуговой сварки: пат. 2063850 Рос. Федерация. МПК 6 В23 К 9/10 / А. Г. Олейников, В. А. Ленивкин, П. И. Петров, Б. Б. Жмайлов. № 94015103/08; заявл. 25.04.94; опубл. 20.07. 96, Бюл. № 20. 6 с.

Цифровая система управления источником питания дуги обеспечивает быстродействующее изменение формы кривой сварочного тока и поддержание штыкового участка вольтамперной характеристики в диапазоне предела регулирования тока. Источник снабжен системой программного управления для сварки плавящимися и неплавящимися электродами.

Для механизированной сварки плавящейся электродной проволокой с постоянной скоростью ее подачи можно получить ИДС импульсами прямоугольной формы от одного источника питания дуги. Для этого необходимо использовать дискретное двухуровневое переключение вольтамперной характеристики источника питания (ВАХ ИП) со штыковым участком в диапазоне рабочих токов сварочного выпрямителя.

Рассмотрим, как изменяются электрические параметры сварки при постоянной скорости подачи электродной проволоки и дискретном переключении ВАХ сварочного выпрямителя с инверторным преобразователем (рис. 5).

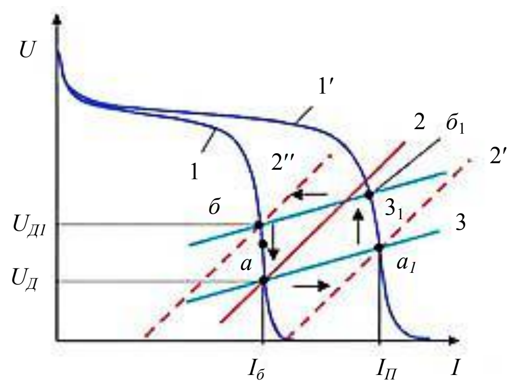


Рис. 5. Изменения энергетических параметров режима при ИДС по гибкой программе: 1 и 1' — ВАХ ИП, обеспечивающие базовый ток $I_б$ и импульсный $I_п$ соответственно; 2 — заданная кривая характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки; 2' и 2'' — фиктивные кривые характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки; 3 и 3_1 — статические вольтамперные характеристики дуги до и после действия импульса тока

Электрические параметры (напряжение $U_д$ и ток дуги $I_б$) устойчивого процесса механизированной сварки плавящейся электродной проволокой определяются точкой *а* (здесь пересекаются ВАХ ИП 1 и линия характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2 при неизменной скорости ее подачи).

Известно, что в любой точке устойчивой работы процесса сварки скорость подачи электродной проволоки ($v_п$) равна скорости ее плавления ($v_э$), а длина дугового промежутка ($\ell_д$) зависит от падения напряжения на дуге и остается неизменной. Поэтому через точку *а* устойчивой работы проходит и статическая вольтамперная характеристика дуги (ВАХ Д) 3 с неизменной ее длиной $\ell_д$ (рис. 5).

Величина тока в точке *а* (рис. 5) выбрана меньше величины тока критического, то есть процесс дуговой сварки с крупнокапельным переносом металла для конкретного диаметра и марки электродной проволоки соответствует базовому току процесса сварки $I_б$, который приблизительно определяется зависимостью:

$$I_б = v_п / k_{ст}. \quad (5)$$

Здесь $v_п$ — скорость подачи электрода; $k_{ст}$ — коэффициент саморегулирования по току дуги; $k_{ст} = \frac{1}{28,3\gamma}\frac{\alpha_{пл}}{d_э^2}$ ($\alpha_{пл}$ — коэффициент расплавления электродной проволоки, г/А·ч); γ — плотность электродной проволоки, г/см^3.

Падение напряжения на дуге ($U_д$) в точке *а* выбрано из условия, чтобы ВАХ ИП 1 обеспечивала устойчивое горение дуги без коротких замыканий дугового промежутка.

При дискретном переключении ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' и неизменной длине дуги параметры режима сварки точки *а* перемещаются в положение точки a_1. (На рис. 5 стрелками указано направление изменения величины $I_д$ и $U_д$). Величина тока дуги в точке a_1 соответствует заданной амплитудной величине тока импульса ($I_п$), который выбирается из условия обеспечения СПМ во время его действия:

$$I_п \geq (1,5 \div 2,0)I_{кр},$$

где $I_{кр}$ — критический ток, который определяется величиной сварочного тока, диаметром и маркой электродной проволоки, длиной дугового промежутка.

Устойчивый процесс сварки с непрерывным горением дуги в точке a_1 и неизменной длиной дуги $\ell_д$ и $I_п$ может установиться при пересечении ВАХ ИП 1' с линией саморегулирования плавления электродной проволоки 2', если падение напряжения будет незначительно больше, чем в точке *а* ($v_п = v_э$). Это связано с тем, что в реальных условиях сварки при измерении падения напряжения на дуге одновременно учитывается и падение

напряжения на вылете электродной проволоки. Поэтому увеличение падения напряжения в точке a_1 вызвано повышением падения напряжения на вылете электрода и сопротивления дуги при большем токе $I_п$.

При переключении ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' параметры режима сварки (ток и напряжение дуги) определяются точкой пересечения ВАХ ИП 1' и ВАХ Д 3. В этом случае процесс сварки неустойчивый, т. к. скорость плавления электродной проволокой в точке a_1 остается неизменной и определяется кривой саморегулирования плавления электрода 2, а $v_э$ при $I_п$ будет больше $v_п$ на величину $\Delta v_э$:

$$\Delta v_э = k_{ст}(I_п - I_б). \qquad (6)$$

При этом длина дуги начнет увеличиваться. Статическая характеристика дуги 3 начнет эквидистантно смещаться вверх из точки a_1 в направлении точки $б_1$.

Установлено, что с увеличением длины дуги при постоянной величине сварочного тока и неизменной скорости подачи электродной проволоки уменьшается ее вылет и снижается тепловая мощность, расходуемая на плавление электрода. Частота струйного переноса металла уменьшается, а размеры переносимых капель увеличиваются. Струйный перенос металла монотонно переходит в крупнокапельный.

При совмещении точки a_1 с точкой пересечения ВАХ ИП 1' и линией саморегулирования плавления электродной проволоки 2 устанавливается новая точка устойчивой работы с переносом металла, как и в точке a, в которой $v_п = v_э$, но при другой длине дуги.

Для ИДС со СПМ необходимо переключать ВАХ ИП из положения 1' в положение 1 при меньшей длине дуги $\ell_{д3}$, чем в точке $б_1$, при которой еще не нарушается СПМ.

Во время горения дуги на токе $I_п$ ВАХ Д перемещается эквидистантно из точки a_1 в точку $б_1$. При этом длина дуги увеличивается на $\Delta\ell_{д1}$, и статическая характеристика дуги займет положение 3_1 (рис. 5). Падение напряжения на дуге возрастет на величину

$$\Delta U_д = k_д \Delta\ell_{д1} + k_{дт}(I_п - I_б), \qquad (7)$$

где $k_д$ — градиент потенциала столба дуги, В/мм; $k_{дт}$ — коэффициент, характеризующий наклон (ВАХ Д).

При дискретном переключении ВАХ ИП из положения 1' в положение 1 параметры режима и процесс сварки переходят из точки $б_1$, соответствующей току импульса $I_п$, в точку $б$, соответствующую базовому току $I_б$. Сварка в точке $б$ была бы устойчивой, если бы ВАХ ИП пересекалась линией характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2", которая соответствует меньшей $v_п$, чем заданная скорость кривой характеристики саморегулирования плавления электродной проволоки 2. Поэтому скорость плавления электродной проволоки $v_э$ в точке $б$ резко замедляется при практически постоянном базовом токе $I_б$. Дуговой промежуток начинает сокращаться, так как $v_п > vэ$. Статическая характеристика дуги эквидистантно смещается из точки $б$ к точке устойчивой работы a. За время горения дуги при базовом токе длина дуги уменьшается на величину $\Delta\ell_{д2}$.

При совмещении статической ВАХ Д 3_1 с характеристикой 3 $\Delta\ell_{д1} = \left|\Delta\ell_{д2}\right|$ напряжение на дуге становится равным заданному нижнему уровню срабатывания двухуровневого датчика. В этот момент ВАХ ИП переключается из положения 1 в положение 1', и процесс периодически повторяется.

Длительность паузы $t_п$ определяется временем горения дуги между точками $б$ и a на токе $I_б$, а длительность импульса $t_и$ — между точками a_1 и $б_1$ на токе $I_п$.

ВАХ ИП из положения 1 в положение 1' и обратно переключается автоматически в зависимости от заданного перепада напряжения горения дуги при базовом и импульсном токе. Перепад напряжения задается для базового тока a и импульсного тока $б_1$. Информацию о базовом и импульсном напряжениях система управления источника питания получает с помощью двухуровневого датчика напряжения. В этом случае система управления сварочным источником питания работает по гибкой программе. Частота переключений «импульс — пауза» зависит от установленной разности падения напряжений между величинами базового и импульсного токов.

В ряде случаев, например при сварке в вертикальном и потолочном положениях, необходима большая скорость полета капель, чем при естественном переносе металла. Поэтому импульсное ведение процесса должно осуществляться и в том случае, когда сварочный ток соответствует мелкокапельному переносу металла, причем должно выполняться условие

$$k_{нр} = f_к / f \ \geq 1 , \qquad (8)$$

где $k_{нр}$ — коэффициент нерегулярности переноса капель, $f_к$ — частота перехода капель под действием импульсов тока, f — частота перехода капель естественного процесса.

Оптимальные параметры импульсного процесса в зависимости от пространственного положения сварки должны отвечать условиям, описанным уравнениями (3) и (8).

Минимальная длительность импульса, обеспечивающая прерывисто-струйный перенос металла, составляет $(4{,}5–5{,}0)\cdot 10^{-3}$ с при $I_п = (1{,}5–2{,}0)\, I_{кр}$. В этом случае частота следования импульсов максимальна (110–

100 имп./с). Наибольшая длительность импульса определяется из условия обеспечения СПМ при постоянной величине $I_п$ и максимально допустимой $\ell_д$. Частота следования импульсов выбирается из условия обеспечения равномерности формирования ширины шва по его длине и не должна быть меньше 10 имп./с.

На рис. 6 приведены фрагменты осциллограмм тока и напряжения ИДС с прерывисто-струйным переносом металла [1].

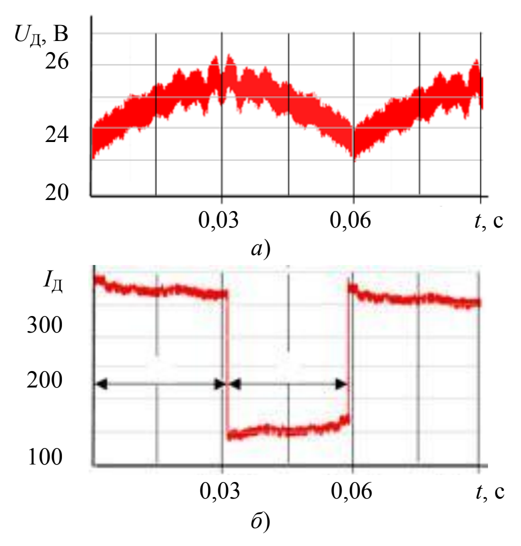


Рис. 6. Фрагмент участка синхронных осциллограмм ИДС импульсами тока прямоугольной формы с ПСПМ: напряжение (*а*), ток дуги (*б*)

На осциллограммах зафиксирован момент перехода горения дуги с базового тока 160 А (точка 1) на ток импульса ($I_п$ = 375 А, точка 2). Ток 160 А меньше критического тока для электродной проволоки 1,2 мм ($I_{кр}$ равно 190÷200 А). Ток в импульсе в этом случае составляет (1,97÷1,87) $I_{кр}$. Падение напряжения на дуге в момент переключения с $I_б$ на $I_п$ составляет 22,8 В. При горении дуги во время действия импульса тока напряжение на ней возрастает до 25,8 В.

Поэтому за время действия импульса тока $t_и$ длительностью $31\cdot10^{-3}$ с длина дуги увеличивается на $\Delta\ell_д \leq 2$ мм, а за время горения дуги на $I_б$ в паузе $t_п$ длительностью $29\cdot10^{-3}$ с длина дуги уменьшается на эту же величину. Частота следования импульсов 16,6 имп/с.

ВАХ ИП автоматически переключается из положения 1, соответствующего сварке на токе паузы ($I_б$), в положение 1_1 (соответствует току импульса) и обратно. Переключение зависит от заданного перепада напряжений

$$\Delta U_д = k_д\Delta\ell_д,$$

где $k_д$ — градиент потенциала столба дуги при сварке в аргоне на токе выше критического 1,4 В/мм) между точками *а* и $б_1$ (соответствует длинам дуги в этих точках, рис. 5).

С помощью двухуровневого датчика напряжения система управления источником питания получает информацию об изменении величины напряжения между базовыми и импульсными токами.

Обсуждение и заключения. Известны две основные разновидности ИДС. Первая — работа в режиме «импульс — капля»: при $t_и$, равном $(1{,}5–2{,}5)\cdot10^{-3}$ с каждый импульс в конце его действия переносит одну каплю электродного металла с электродной проволоки в сварочную ванну. В этом случае процессы плавления и переноса электродного металла в значительной мере разделены во времени.

При второй разновидности ИДС импульс действует значительно дольше ($t_и \geq 4{,}0\cdot10^{-3}$ с и более), и происходит прерывисто-струйный перенос металла. В этом случае процессы плавления и переноса металла совмещены.

Система управления процессом импульсно-дуговой сварки обеспечивает плавную регулировку частоты следования импульсов тока, которая зависит от заданного приращения длины дугового промежутка, т. е. напряжения срабатывания двухуровневого датчика и амплитуды тока импульса. Частота следования им-

[1] Способ импульсно-дуговой сварки: пат. 2570145 Рос. Федерация. МПК B23 K 9/09, B23 K 9/16 / В. А. Ленивкин, Д. М. Киселёв, Н. Г. Дюргеров. № 2014108519/02; заявл. 06.03.2014; опубл. 10.12. 2015. Бюл. № 34. 5 с.

пульсов тока, длительность импульсов и пауз изменяются плавно и определяются приращением длины дугового промежутка во время действия тока импульса в зависимости от величин заданного тока в паузе и импульсе.

Гибкость программы ПСПМ достигается за счет применения двухуровневого датчика напряжения. Нижний уровень напряжения срабатывания датчика определяется параметрами режима сварки, обеспечивающими устойчивый режим процесса в паузе на токе ниже критического. Верхний уровень зависит от удлинения дуги на 0,5–2,0 мм при горении дуги на токе, обеспечивающем СПМ.

Разработанная система ИДС прямоугольными импульсами путем переключения комбинированных ВАХ-выпрямителей с инверторным преобразователем применяется при механизированной сварке в аргоне и газовой смеси (аргон > 80 % и CO_2 < 20 %) по жесткой программе «импульс — капля» и гибкой программе «прерывисто-струйный перенос».

Итоги изучения возможности управления технологическими свойствами сварочной дуги и предложенные методики расчета параметров режима ИДС стали основой разработки технологии и оборудования для механизированной ИДС плавящимся электродом узлов из алюминиевых сплавов АМц, АМцМ, АД1, АМг6, АМг61, 01915. Указанные разработки внедрены на предприятиях авиационной промышленности, судостроения. Решения для нержавеющих и жаропрочных сталей и сплавов используются на моторостроительных предприятиях.

В результате исследований особенностей процесса механизированной сварки активированной электродной проволокой в углекислом газе разработана технология механизированной ИДС для узлов корпусов электропечей из нержавеющей стали Х18Н10Т, узлов конструкций дорожно-строительных, сельскохозяйственных машин и судов активированной электродной проволокой Св-08Г2С. По результатам научно-исследовательских работ 1985 года в «Энергоатомиздате» была издана монография «Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом».

Разработки защищены 17 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения. По результатам исследований опубликована 31 статья в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Библиографический список

1. Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах / А. Г. Потапьевский. — Киев : Экотехнология, 2007. — 192 с.

2. Дюргеров, Н. Г. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров, В. А. Ленивкин. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 80 с.

3. Ленивкин, В. А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. — 3-е изд., доп. — Москва : Машиностроение, 2011. — 368 с.

4. Крампит, А. Г. Влияние параметров импульсов сварочного тока на формирование сварного шва / А. Г. Крампит // Сварка и диагностика. — 2013. — № 2. — С. 11–13.

5. Крампит, А. Г. Влияние величины жидкой прослойки на формирование заполняющих слоев при импульсно-дуговой сварке в щелевую разделку / А. Г. Крампит // Сварка и диагностика. — 2014. — № 2. — С. 13–16.

6. К вопросу саморегулирования дуги при сварке плавящимся электродом / Б. Е. Патон, В. С. Сидорук, С. Ю. Максимов, Ю. Н. Сараев // Сварочное производство. — 2014. — № 12. — С. 3–11.

7. Дюргеров, Н. Г. Устойчивость системы саморегулирования при механизированной и автоматической сварке / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров // Сварочное производство. — 2009. — № 2. — С. 13–14.

8. Дюргеров, Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // Сварочное производство. — 2004. — № 4. — С. 14–18.

9. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG/MAG сварке / Н. П. Алешин, Э. А. Гладков, В. Н. Бродягин [и др.] // Сварка и диагностика. — 2014. — № 3. — С. 43–47.

Сдана в редакцию 27.12.2019
Запланирована в номер 03.02.2020

Об авторах:

Ленивкин Вячеслав Андреевич, ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3325-5515, weld-dstu@ya.ru

Рогозин Дмитрий Викторович, заведующий кафедрой «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-33110524, dmrogozin@ya.ru

Заявленный вклад соавторов

В. А. Ленивкин — формирование основной концепции, определение целей и задач исследования, разработка теоретических основ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, научное руководство; В. Д. Рогозин — исследование саморегулирования процесса импульсно-дуговой сварки в защитных газах, обработка и оформление результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 36–41. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 36–41. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



УДК 629.4.02+06 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41

Моделирование динамики рычажной передачи тормозной системы в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности (на примере пассажирского вагона)



И. А. Яицков, В. В. Косаревский
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена моделированию динамических процессов рычажной передачи тормозной системы пассажирского вагона в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности.
Цели работы: разработка модуля контакта «тормозная колодка рычажной передачи – рабочая поверхность колеса» в полноразмерной компьютерной модели пассажирского вагона в программном комплексе «Универсальный механизм»; компьютерное моделирование рабочего режима торможения от 50 до 32 км/ч, с учетом вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей пути, для определения закономерностей изменения продольного ускорения тормозной колодки и ее углового ускорения. Предмет исследования — силовое взаимодействие элементов и динамические процессы в рычажной передаче тормозной системы пассажирских вагонов.
Материалы и методы. В программный комплекс «Универсальный механизм» предложен новый модуль контакта «тормозная колодка рычажной передачи – рабочая поверхность колеса», который позволил определить продольные и угловые ускорения тормозной колодки рычажной передачи пассажирского вагона. Проведено имитационное моделирование рычажной передачи тормозной системы пассажирского вагона с тележками КВЗ-ЦНИИ типа II, оснащенного колодочными тормозами.
Результаты исследования. Разработана полноразмерная компьютерная модель пассажирского вагона в программном комплексе «Универсальный механизм», в которую включен разработанный модуль контакта «тормозная колодка рычажной передачи — рабочая поверхность колеса». Вагон представлен как система твердых тел, соединенных упругими и диссипативными элементами. При помощи компьютерного моделирования воспроизведен рабочий режим торможения при снижении скорости пассажирского вагона от 50 до 32 км/ч с учетом вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей железнодорожного пути. Результатом моделирования явились закономерности изменения продольного ускорения тормозной колодки и ее углового ускорения в процессе торможения в вышеуказанном диапазоне скоростей. Построены спектры продольного углового ускорения тормозной колодки. Выявлено, что наличие неровностей пути оказывает влияние на спектральный состав ускорений. Кроме этого, при наложении колебаний подпрыгивания и галопирования рамы тележки при движении по пути с неровностями, колодка рычажной передачи может перемещаться вверх-вниз по рабочей поверхности колеса с размахом, достигающим 50 мм. Расширены функциональные возможности моделирования динамических процессов рычажной передачи тормозной системы пассажирского вагона в пакете программного комплекса «УМ-Локо».
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования новых и модернизации существующих рычажных передач тормозной системы пассажирских вагонов на машиностроительных предприятиях и вагоноремонтных предприятиях. Это, в свою очередь, должно обеспечить равномерное распределения усилий по всем тормозным колодкам рычажной передачи пассажирского вагона.

Ключевые слова: рычажная передача, тормозная система, вагон, колодка, динамика, моделирование, торможение, неровности пути.

Для цитирования: Яицков, И. А. Моделирование динамики рычажной передачи тормозной системы в процессе торможения на участке пути, имеющему неровности (на примере пассажирского вагона) / И. А. Яицков, В. В. Косаревский // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, №1. — С. 36−41. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41



Brake rigging dynamic simulation under braking on a track section with irregularities (the case of a passenger car)

I. A. Yaitskov, V. V. Kosarevskii
Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper considers simulation of the dynamic processes of the brake rigging of a passenger car under braking on a track section with irregularities. The work objectives include the development of a “rigging brakeblock - wheel working surface” contact module in a full-scale computer model of a passenger car in the “Universal Mechanism” software package; and a computer simulation of the braking operating mode from 50 to 32 km/h considering vertical and horizontal track rail irregularities for determining the mechanism of variation of the longitudinal acceleration of the brakeblock and its angular acceleration. The subject of the study is the force interaction of the elements and dynamic processes in the brake system of passenger cars.
Materials and Methods. A new “rigging brakeblock - wheel working surface” contact module, which provides the determination of the longitudinal and angular accelerations of the brake rigging of a passenger car, is proposed to the “Universal Mechanism” software package,. The simulated modeling of the brake rigging system of a passenger car with KVZ-TsNII type II trolleys equipped with shoe brakes is carried out.
Results. A full-scale computer model of a passenger car, which includes the designed contact module “linkage brake pad - wheel working surface”, has been developed in the “Universal Mechanism” software package. The car is presented as a system of solids connected by elastic and dissipative elements. Using computer simulation, the operating mode of braking was reproduced under reducing the speed of a passenger car from 50 to 32 km/h considering vertical and horizontal irregularities of a railway track. The simulation result was the laws of change in the longitudinal acceleration of the brakeblock and its angular acceleration under braking in the above speed range. Their spectra of longitudinal angular acceleration of the brakeblock were constructed. It was determined that the presence of track irregularities affects the spectral composition of the accelerations. In addition, under the superposition of the bogie-frame pitching and bouncing oscillations, when moving along an uneven track, the rigging block can move up and down the wheel-working surface within a range of up to 50 mm. The simulation functionality of the dynamic processes of the brake system of a passenger car was expanded in the “UM-Loko” software package.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used in the design of new rigging brake systems of passenger cars and modernization of existing ones at the engineering enterprises and railway-car repair works. This, in turn, should ensure uniform distribution of efforts across all brake rigging brakeblocks of a passenger car.

***Keywords**:* rigging, brake system, wagon, block, dynamics, simulation, braking, track with irregularities.

For citation: I. A. Yaitskov, V. V. Kosarevskii. Brake rigging dynamic simulation under braking on a track section with irregularities (the case of a passenger car). Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 37−42. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-36-41

Введение. Проблема обеспечения эффективной и надежной работы тормозных систем пассажирских вагонов становится еще более актуальной при внедрении на железных дорогах России скоростного движения. Основной частью современных тормозных систем является рычажная передача тормозной системы пассажирского вагона, эффективность и надежность работы которой непосредственно зависит от качества проектирования, эксплуатации, обслуживания и ремонта тормозного оборудования. Механическая часть тормозной системы объединяет рычажную тормозную передачу, автоматический регулятор рычажной передачи и фрикционные элементы тормоза (тормозные колодки и накладки). Одним из основных требований к рычажной передаче тормозной системы является обеспечение равномерного распределения усилий по всем тормозным колодкам. Однако в условиях эксплуатации наблюдается некоторый разброс в усилиях нажатия тормозных колодок на колесные пары как в пределах вагона, так и каждой тележки. Неравномерность распределения нажатий тормозных колодок может быть одной из основных причин их неравномерного износа. Предметом исследования являются силовое взаимодействие элементов и динамические процессы в рычажной передаче тормозной системы пассажирских вагонов. Уровень проведенных теоретических исследований динамических процессов элементов конструкций тягового подвижного состава достаточно высок [1–12].

Материалы и методы. С целью уточнения и подтверждения результатов проведенных теоретических исследований необходимо провести компьютерное моделирование динамических процессов рычажной передачи тормозной системы пассажирского вагона, протекающих при торможении на ровном участке пути. Основными причинами динамических процессов в контакте «тормозная колодка рычажной передачи – рабочая поверхность колеса» могут быть колебания экипажной части вагона при движении по пути, имеющем неровности. Это связано с тем, что колодки и элементы рычажной передачи тормозной системы конструктивно связаны с рамой тележки, которая за счет деформаций буксового подвешивания перемещается по отношению к катящимся по рельсам колесным парам. Необходимо перейти к моделированию процесса торможения при наличии неровностей пути.

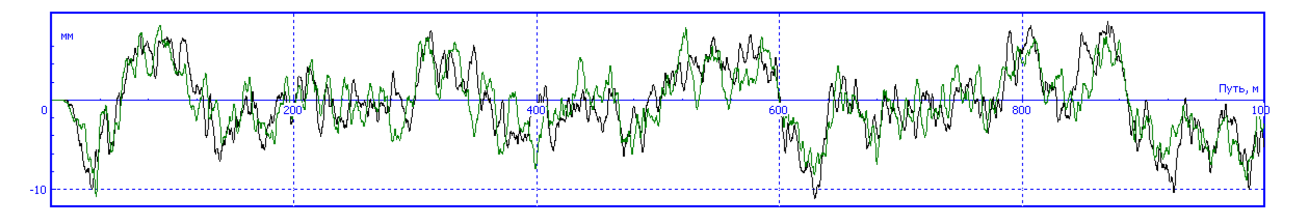


Рис. 1. Пример вертикальных неровностей рельсовых нитей пути

Файлы вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей, представляющие собой обобщение результатов путеизмерений, имеются в составе программного комплекса «УМ-Локо». На рис. 1 в качестве примера показаны вертикальные неровности на участке длиной 1000 м.

Результаты исследования. Результаты моделирования динамических процессов рычажной передачи тормозной системы на ровном пути представлены на рис. 2. Картина пятен контакта «колесо – рельс» для всех четырех колесных пар вагона, при наличии неровностей пути, показана на рис. 3. Сопоставление результатов моделирования с рис. 2 позволяет сделать вывод о том, что наличие неровностей приводит к возникновению вертикальных колебаний экипажной части и, как следствие, к значительному изменению усилий в пределах пятна контакта «колесо-рельс».

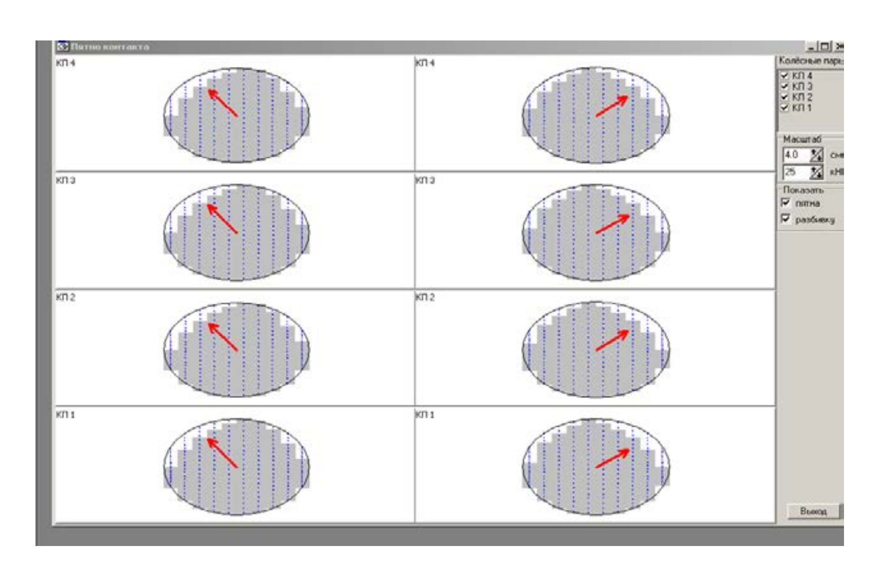


Рис. 2. Пятна контакта «колесо-рельс» и распределение усилий (ровный путь)

При движении по пути с неровностями колебания подпрыгивания рамы тележки имеют амплитуду, достигающую 18 мм, в спектре колебаний просматриваются частоты 0,8; 0,95 и 1,07 Гц. Последняя частота близка к собственной частоте галопирования кузова.

Колебания галопирования рамы тележки имеют амплитуду до 0,0025 рад. В спектре имеются частоты 0,25; 0,8; 0,95; 3,7 и 3,9 Гц.

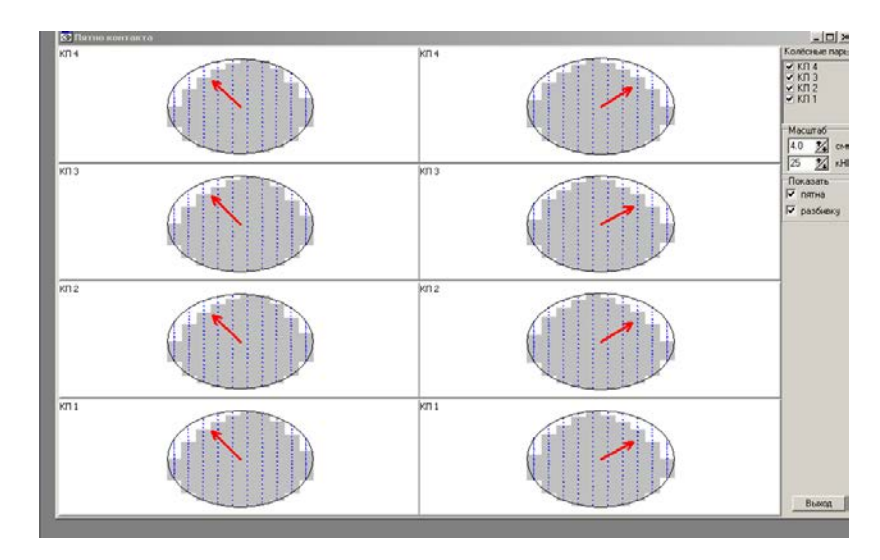


Рис. 3. Пятна контакта «колесо-рельс» и распределение усилий (неровный путь)

На рис. 4 и 5 показан график продольного ускорения колодки рычажной передачи в процессе торможения при наличии неровностей пути и его спектральный состав.

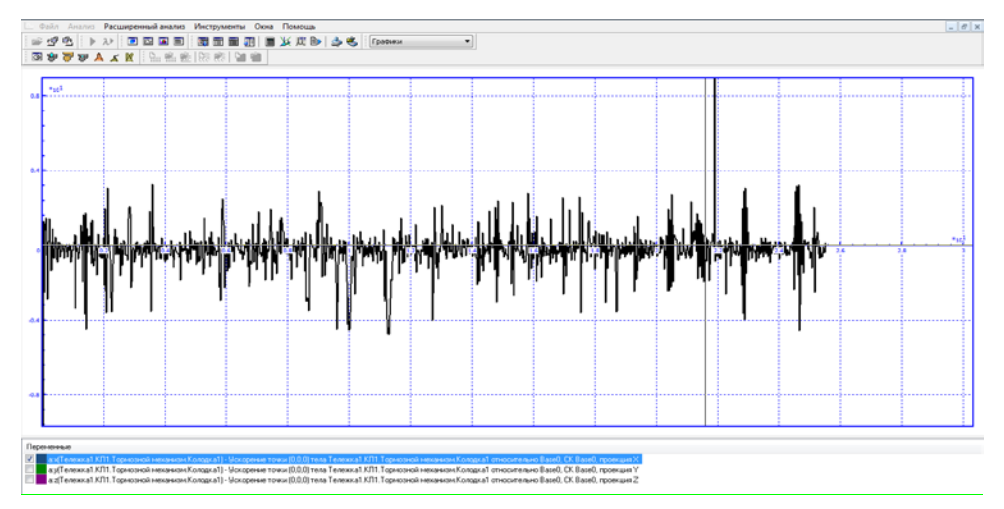


Рис. 4. Продольное ускорение колодки рычажной передачи
в процессе торможения (путь с неровностями)

На рис. 6 и 7 показан график углового ускорения колодки рычажной передачи в процессе торможения при наличии неровностей пути и его спектральный состав.

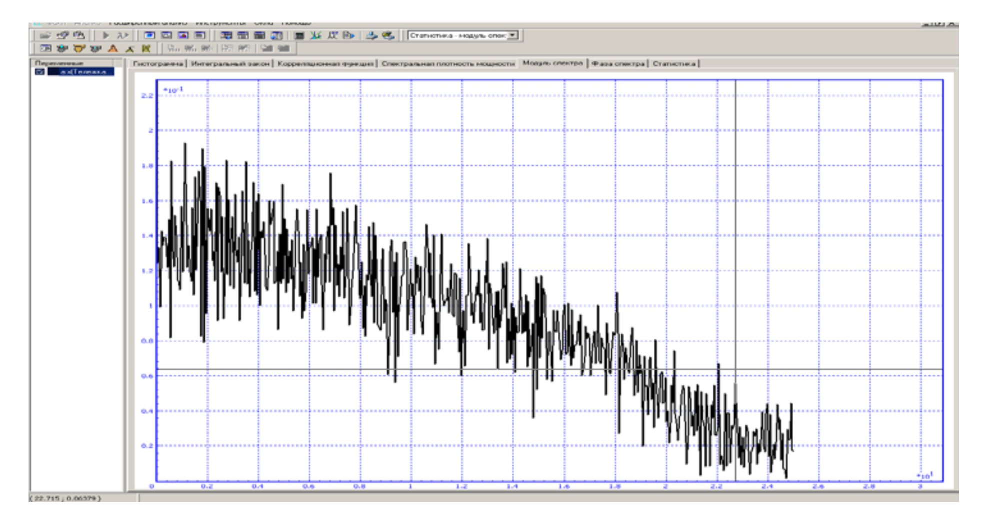


Рис. 5. Спектральный состав продольного ускорения колодки
рычажной передачи (путь с неровностями)

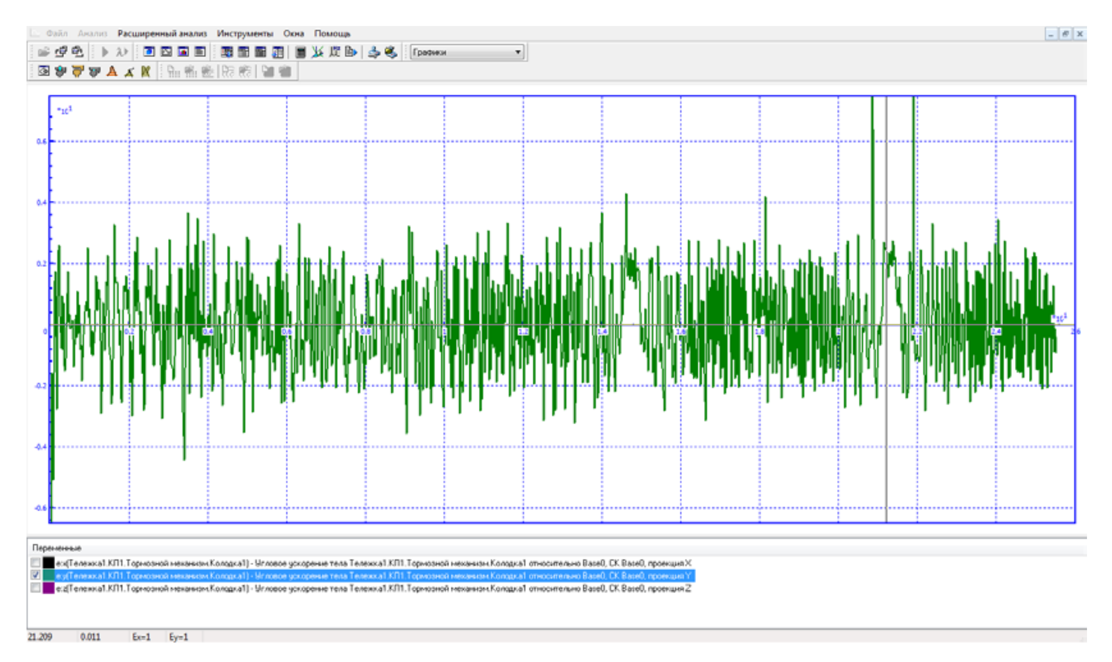


Рис. 6. Угловое ускорение колодки рычажной передачи (путь с неровностями)

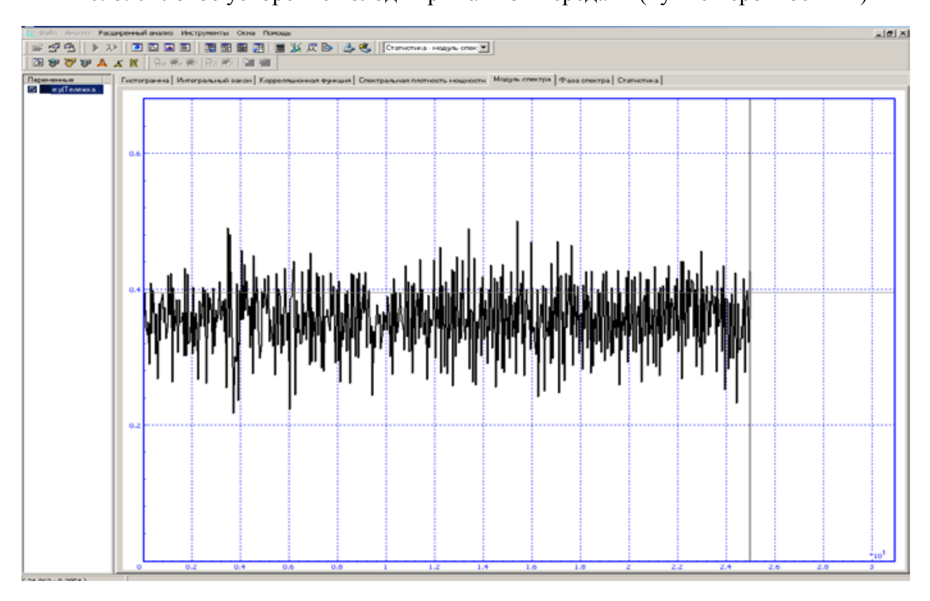


Рис. 7. Спектральный состав углового ускорения (путь с неровностями)

Из результатов моделирования видно, что при наличии неровностей пути продольные и угловые колебания колодок происходят в частотном диапазоне до 25 Гц, причем их спектральный состав несколько отличается от случая, когда торможение происходит по ровному пути.

Обсуждение и заключения. Разработана полноразмерная компьютерная модель пассажирского вагона в программном комплексе «Универсальный механизм». Вагон представлен как система твердых тел, соединенных упругими и диссипативными элементами. В состав модели включен разработанный контакт «тормозная колодка рычажной передачи — рабочая поверхность колеса». При помощи компьютерной модели воспроизведен рабочий режим торможения от 50 до 32 км/ч. Рассмотрен вариант, когда путь имеет вертикальные и горизонтальные неровности рельсовых нитей. В результате моделирования получены закономерности изменения продольного ускорения тормозной колодки и ее углового ускорения в процессе торможения от 50 до 32 км/ч, построены их спектры. Наличие неровностей пути оказывает влияние на спектральный состав ускорений. Кроме того, при наложении колебаний подпрыгивания и галопирования рамы тележки при движении по пути с неровностями, колодка рычажной передачи может перемещаться вверх-вниз по рабочей поверхности колеса с размахом, достигающим 50 мм. Полученные результаты могут быть использованы в процессе проектирования новых и модернизации существующих рычажных передач тормозной системы пассажирских вагонов на машиностроительных предприятиях и вагоноремонтных предприятиях с целью обеспечения равномерного распределения усилий по всем тормозным колодкам.

Библиографический список

1. Лилов, Л. К. Моделирование систем связанных твердых тел / Л. К. Лилов. — Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1993. — 272 с.
2. Шилен, В. Динамика систем твердых тел / В. Шилен // В сб.: Динамика высокоскоростного транспорта; под ред. Т. А. Тибилова. — Москва : Транспорт, 1988. — С. 32–39.
3. Schiehlen, W. (ed.). Multiboby systems handbook / W. Schiehlen. – Berlin: Springer, 1991.
4. Kreuzer, E. Generation of symbolic equations of motion of multibody systems // Computerized symbolic manipulations in mechanics. Springer-Verlag, 1994. — P. 1–67.
5. Ефимов, Г. Б. Некоторые алгоритмы автоматизированного синтеза уравнений движения системы твердых тел / Г. Б. Ефимов, Д. Ю. Погорелов. — Москва : Ин-т. прикл. матем. им. М.В. Келдыша РАН, 1993. — 30 с.
6. Погорелов, Д. Ю. Моделирование механических систем с большим числом степеней свободы. Численные методы и алгоритмы. автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук. / Д. Ю. Погорелов. — Брянск, 1994. — 18 с.
7. Погорелов, Д. Ю. Введение в моделирование динамики систем тел / Д. Ю. Погорелов. — Брянск : Изд-во БГТУ, 1997. — 155 с.
8. Fisette, P. Dynamic behavior comparison between bogies: rigid or articulated frame, wheelset or independent wheels / P. Fisette, K. Lipinski, J.C. Samin // The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks: Vehicle System Dynamics Supplement, 1996. — P.152–174.
9. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов / Ю. А. Бахвалов [и др.]. — Москва : Маршрут, 2006. — 374 с.
10. Балон, Л. В. Нестационарные динамические процессы в системе «тормозная колодка-колесо» / Л. В. Балон, П. А. Коропец, В. В. Косаревский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2008. — № 3. — С. 33–42.
11. Косаревский, В. В. Математическая модель и методика исследования динамики рычажной тормозной системы в установившихся режимах / В. В. Косаревский, Л. В. Балон, П. А. Коропец // Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2009. — № 3. — С. 15–22.
12. Косаревский, В. В. Динамические характеристики рычажной тормозной системы в установившихся режимах / В. В. Косаревский, Л. В. Балон, П. А. Коропец // Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2009. — № 4. — С. 33–42.

Поступила в редакцию 29.01.2020
Запланирована в номер 02.03.2020

Об авторах:

Яицков Иван Анатольевич, декан факультета «Электромеханический», доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), кандидат технических наук, доцент, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8937-8875, yia3@rgups.ru

Косаревский Валерий Валерьевич, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5040-5098, kosarewskij@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. А. Яицков — научное руководство, анализ полученных результатов исследований, анализ возможности практической реализации рассматриваемой методики; В. В. Косаревский — постановка цели и задачи исследования, сбор и обработка материала, проведение расчетов, оформление текста, формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.01:621.643.053 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50

Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов



А. Е. Филяков[1], М. А. Шолохов[2]

[1] ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (г. Москва, Российская Федерация)
[2] ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

Введение. Так как при строительстве магистральных трубопроводов сварка является единственным способом соединения отдельных труб в непрерывную нитку, то современные системы управления качеством продукции сварочного производства основаны на минимизации вероятности появления характерных дефектов. Это достигается мониторингом и документированием сварочных работ.
Материалы и методы. Проведенный анализ систем мониторинга процессов ручной, механизированной и автоматической орбитальной сварки показал, что промышленность остро нуждается в системах, не просто контролирующих и документирующих процесс сварки, но и прогнозирующих качество сварных соединений. Это актуализирует необходимость разработки интеллектуального модуля, который смог бы на основании результатов мониторинга в режиме реального времени оперативно прогнозировать качество сварных соединений.
Результаты исследования. Так как теоретическая связь результатов прогнозирования с показателями качества шва характеризуется взаимодействием значительного количества физических явлений, протекающих во времени, то результаты процесса сварки могут быть описаны только достаточно полной нестационарной физико-математической моделью сварочного процесса. Однако с целью возможности прогнозирования результатов процесса сварки непосредственно при их мониторинге предлагается упрощенная модель прогнозирования, главной особенностью которой является возможность синхронного выполнения расчётов с реальным процессом, что реализуется в цикле реального времени с заданным шагом.
Обсуждение и заключения. Главным препятствием успешного функционирования модуля оперативного прогнозирования, помимо длительности численного решения уравнений модели, является погрешность оценки. Чтобы обеспечить минимальную погрешность виртуального воспроизведения при упрощении необходимо провести комплексные исследования значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Эти соображения определили содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки. Несомненно, что информация по прогнозированию качества сварных соединений должна поступать в систему управления качеством трубопроводов более высокого уровня, а также анализироваться строительными организациями с целью выработки профилактических мер по совершенствованию организации и выполнению сварочных работ.

Ключевые слова: сварка, прогнозирование качества, сварочные работы, сварное соединение, магистральный трубопровод, физико-математическая модель.

Образец для цитирования: Филяков, А. Е. Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов / А. Е. Филяков // Вестник Донского государственного технического. — 2020. — Т. 20, №1. — С. 42−50. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50



On solving problems of operational forecasting of main pipeline weld joint quality

A. E. Filyakov[1], M. A. Sholokhov[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)
[2] Yeltsin UrFU, (Ekaterinburg, Russian Federation)

Introduction. Since welding is the only means to connect pipe lengths into a continuous line when constructing main pipelines, modern quality management systems for the welding industry products are based on minimizing the occurrence of specific defects. This is achieved through monitoring and documenting welding procedures.
Materials and Methods. The analysis of monitoring systems customized for manual, mechanized and automatic orbital welding has shown that the industry urgently needs systems that not only control and document the welding process, but also predict the quality of weld joints. This actualizes the need to develop an intelligent module that could, basing on real-time monitoring results, predict the quality of welded joints on the fly.
Results. Since the theoretical connection between the forecasting results and weld quality attributes is characterized by the interaction of a significant number of physical phenomena continuous in time, the results of welding can be described only by a sufficiently complete nonstationary physicomathematical model of the welding process. However, in order to be able to predict the results of welding directly during the monitoring of the process, a simplified forecasting model is proposed whose key feature is the ability to perform calculations synchronously with the real process, which is implemented in a real-time mode with a given interval.
Discussion and Conclusions. The major obstacle to the successful functioning of the operational forecasting module, apart from the length of the numerical solution of equations, is an estimation error. To ensure the minimum error of virtual display during simplification, it is necessary to conduct comprehensive studies of the significance and influence of individual factors and phenomena on quality attributes. These observations determined the content and sequence of work on the creation and implementation of an intelligent module for the operational forecasting of welding quality. Undoubtedly, the information on the forecasting of the weld joint quality should enter a higher-level pipeline quality management system, as well as be analyzed by construction organizations in order to develop preventive measures to improve the organization and performance of welding work.
Introduction. Since welding is the only means to connect pipe lengths into a continuous line when constructing main pipelines, modern quality management systems for the welding industry products are based on minimizing the occurrence of specific defects. This is achieved through monitoring and documenting welding procedures.
Materials and Methods. The analysis of monitoring systems customized for manual, mechanized and automatic orbital welding has shown that the industry urgently needs systems that not only control and document the welding process, but also predict the quality of weld joints. This actualizes the need to develop an intelligent module that could, basing on real-time monitoring results, predict the quality of welded joints on the fly.
Results. Since the theoretical connection between the forecasting results and weld quality attributes is characterized by the interaction of a significant number of physical phenomena continuous in time, the results of welding can be described only by a sufficiently complete nonstationary physicomathematical model of the welding process. However, in order to be able to predict the results of welding directly during the monitoring of the process, a simplified forecasting model is proposed whose key feature is the ability to perform calculations synchronously with the real process, which is implemented in a real-time mode with a given interval.
Discussion and Conclusions. The major obstacle to the successful functioning of the operational forecasting module, apart from the length of the numerical solution of equations, is an estimation error. To ensure the minimum error of virtual display during simplification, it is necessary to conduct comprehensive studies of the significance and influence of individual factors and phenomena on quality attributes. These observations determined the content and sequence of work on the creation and implementation of an intelligent module for the operational forecasting of welding quality. Undoubtedly, the information on the forecasting of the weld joint quality should enter a higher-level pipeline quality management system, as well as be analyzed by construction organizations in order to develop preventive measures to improve the organization and performance of welding work.

Keywords: welding, quality forecasting, welding procedures, weld joint, main pipeline, physical and mathematical model

For citation: A. E. Filyakov. On solving problems of operational forecasting of main pipeline weld joint quality. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 42−50. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50

Введение. Последовательное развитие инфраструктуры нефтегазовой отрасли требует постоянного совершенствования трубопроводных систем, так как трубопроводный транспорт в настоящее время наиболее предпочтителен для транспортировки углеводородного сырья и продуктов его переработки. Известно, что на

современном этапе развития технологии строительства магистральных трубопроводных систем сварка является единственным способом соединения отдельных труб в непрерывную нитку непосредственно на трассе.

С учетом последствий аварий и отказов в работе, магистральные трубопроводы относятся к категории опасных производственных объектов. Так как по данным Ростехнодзора свыше 85% аварий и катастроф на объектах происходит из-за разгерметизации или отказа сварных соединений, то весьма актуальна проблема обеспечения качества сварных соединений. Поэтому качество проведения сварочных работ является основой безопасной эксплуатации любой трубопроводной транспортной системы [1].

Качество сварного шва оценивают размерами его поперечного сечения, механическими свойствами металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), распределением напряжений и остаточных деформаций, вероятностью возникновения холодных и горячих трещин, наличием пор, несплавлений и др. дефектов. Современные системы управления качеством продукции сварочного производства основаны на минимизации вероятности появления характерных дефектов. Для этого проводят организационно-технические мероприятия по подготовке и реализации процессов сварки. Такой подход способствует не только повышению качества сварных соединений, но и совершенствованию сварочных технологий, рациональному выбору сварочных материалов, развитию методов контроля процессов сварки. В этой связи рассмотрим подробнее основные сварочные технологии, применяемые при строительстве трубопроводов.

Материалы и методы. В настоящее время наиболее часто используемым методом соединения труб магистральных трубопроводов в нитку является дуговая сварка плавлением. При строительстве трубопроводов применяют ручную, механизированную и автоматическую сварку. Ручная дуговая сварка характеризуется простотой реализации, мобильностью оборудования, однако она достаточно трудоемка и требует большого количества квалифицированных кадров. Кроме того, при ручной дуговой сварке возможно возникновение значительного количества дефектов. Механизированная (полуавтоматическая) сварка трубопроводов, по сравнению с ручной дуговой сваркой, более производительна. Однако и она не лишена недостатков, главные из которых — повышенное разбрызгивание электродного металла, проблемы газовой защиты, выделение аэрозолей, особенно при сварке самозащитной порошковой проволокой. Следует отметить, что способы ручной и механизированной сварки характеризуются высокой степенью субъективного влияния исполнителей. Менее значим «человеческий фактор» для автоматических способов сварки. Однако автоматическая орбитальная сварка, в сравнении с ручной и механизированной сваркой, менее мобильна. В настоящее время среди установок для автоматической орбитальной сварки следует выделить оборудование для сварки плавящимся электродом с управляемым каплепереносом электродного металла [2]. Для снижения влияния характерных возмущений весьма перспективно применение адаптивных технологий, оперативно корректирующих процесс сварки [3].

Среди расходных материалов, широко применяемых для автоматической и механизированной сварки, можно выделить газозащитные порошковые проволоки. Самозащитные проволоки, несмотря на целый ряд преимуществ, применяются в значительно меньших объемах.

В последние годы активизировались попытки внедрения при строительстве более производительных технологий автоматической сварки, например, плазменной, лазерной, контактно-стыковой, а также сварки с сочетанием различных источников нагрева [4]. Однако все эти способы сварки пока не нашли промышленного применения или используются в крайне ограниченных объемах. Внедрение автоматических сварочных процессов снижает влияние человека на качество сварных соединений. Однако вопросам, касающимся выполнения сварщиком или оператором сварочного оборудования предписанных требований и инструкций по производству работ, уделяется пристальное внимание.

В настоящее время процедуры мониторинга сварочных работ стали составной частью научно-технического сопровождения строительства магистральных трубопроводов. Процедуры мониторинга обеспечивают наблюдение за энергетическими параметрами процессов сварки, предупреждение и профилактику причин несоответствия сварных соединений требованиям нормативно-технической документации (НТД), контроль их устранения. Одновременно процедуры мониторинга позволяют реализовать ряд требований по документированию выполняемых работ. Это достигается подключением к современному сварочному оборудованию специальных регистраторов с соответствующим программным обеспечением [5].

Типовая схема функционирования подобных систем представлена на рис. 1.

Разработкой подобных систем мониторинга, регистрации и документирования параметров процесса сварки занимается целый ряд отечественных высокотехнологичных наукоемких предприятий. Системы могут быть встроены в современные цифровые источники сварочного тока или изготовлены в виде отдельных блоков.

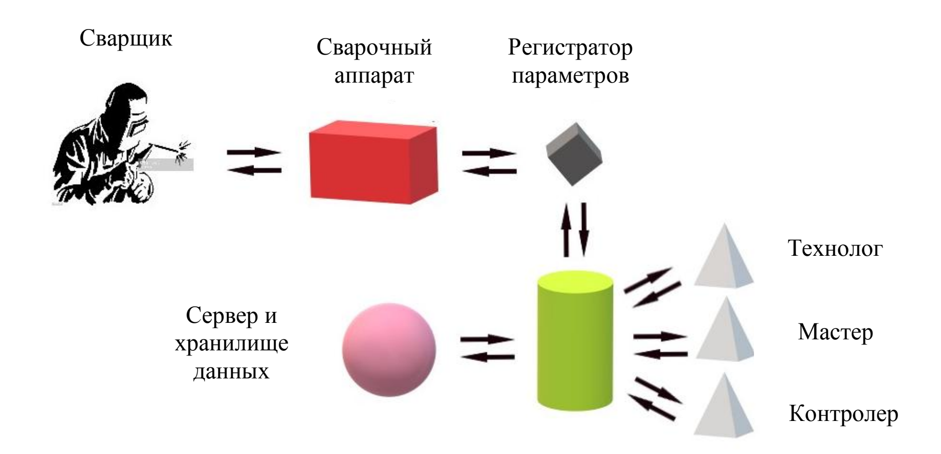


Рис. 1. Информационные потоки мониторинга процессов сварки

При мониторинге процесса дуговой сварки для регистрации параметров авторами работы [6] была разработана многопостовая (до 64 сварочных постов) регистрирующая система измерения, отображения и сохранения данных о токе сварки, напряжении на дуге и температуры свариваемых деталей. Регистраторы такой системы могут располагаться на расстоянии до 300 м от места установки персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (ПО).

Схожие решения используются и другими разработчиками систем документации процессов сварки, например, предприятиями «Шторм», «НПФ ИТС», «Тэлма», «Эллой» и др. Система мониторинга и контроля «Weld Telecom», разработанная компанией «Эллой», обеспечивает поступление информации как с единичного поста, так и с целого парка сварочного оборудования через удаленный сервер с использованием проводной или беспроводной сети Wi-Fi. Такие возможности системы Weld Telecom обеспечивают наблюдение за выполняемыми сварщиками технологическими операциями и контроль технического состояния сварочного оборудования. Причем система позволяет как наблюдать за процессом, так и передавать команды по корректировке режимов сварки, что следует считать значимым шагом в реализации концепции Industry 4.0 с помощью датчиков и сетей. Помимо этого, система обеспечивает документирование процессов сварки с автоматизацией сбора, систематизации и хранения информации для формирования паспортов свариваемых изделий и использования их при управлении качеством продукции. Возможности системы «Weld Telecom» по обработке и визуализации параметров режима сварки приведены на рис. 2.

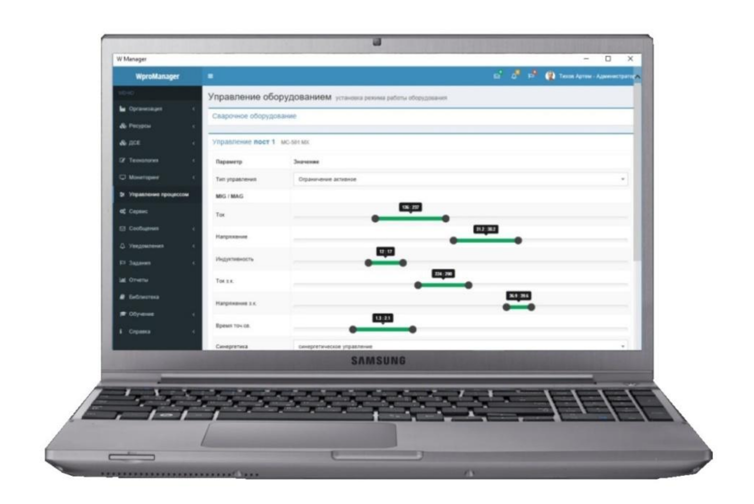


Рис. 2. Возможности системы «Weld Telecom» по визуализации параметров

Активно занимаются разработкой систем регистрации и документирования процессов сварки и зарубежные разработчики и производители сварочного оборудования. Подобные российским компаниям решения по регистрации параметров процесса сварки демонстрируют фирмы Fronius (Австрия), Kemppi (Финляндия), Miller Electric (США) и целый ряд других зарубежных компаний.

Следует отметить, что несколько бóльшими возможностями обладают системы мониторинга и кон-

троля Production Monitoring компании Lincoln Electric (США) и Merkle Quality Control компании Merkle Group Inc (США). Эти системы не просто осуществляют мониторинг и регистрацию параметров процесса сварки, но выявляют и регистрируют данные об их отклонениях [7]. Система Production Monitoring в режиме on-line сравнивает заранее заданные пользователем значения напряжения, тока, скорости подачи электродной проволоки, временного интервала процесса сварки с фактическими значениями. Система Merkle Quality Control обеспечивает документирование и контроль до 8 параметров процесса механизированной сварки с возможностью их архивации. Такие возможности системы фиксации отклонений обеспечивают независимые сенсоры тока, напряжения, проволоки и газа. Однако такие системы устойчиво работают только с оборудованием собственной разработки.

Поэтому можно констатировать, что наиболее популярные системы мониторинга процессов сварки используются для документирования их параметров, а также для анализа расхода материалов, использования рабочего времени, регистрации выхода параметров за пределы допусков, дисциплинирования сварщиков. Однако ни одна из систем не отвечает на главный вопрос — к каким последствиям приведут выявленные отклонения. С учетом ввезженного, нужны системы, не только контролирующие и документирующие процесс сварки, но и прогнозирующие его результаты. Следует отметить, что, несмотря на попытки прогнозировать качество сварных соединений по результатам мониторинга параметров процессов сварки, предпринятые как в начале нынешнего столетия [8], так и позднее [9], систем оперативного прогнозирования качества непосредственно на месте выполнения сварочных работ на сегодняшний день попросту не существует. Все это актуализирует необходимость разработки интеллектуального модуля, который смог бы оперативно прогнозировать качество сварных соединений. Однако создать такой модуль можно только связав показатели качества сварных соединений с фактическими параметрами режима сварки, регистрируемыми в режиме on-line.

Обсуждение и заключения. К сожалению, теоретическая связь результатов прогнозирования с показателями качества шва характеризуется взаимодействием значительного количества физических явлений, протекающих во времени, так как именно они определяют подвод тепла, условия формирования и кристаллизации сварочной ванны, размеров шва и микроструктуры ЗТВ [10]. Однако представление процессов сварки в виде сложных, многофакторных систем позволяет использовать при их исследовании математическое моделирование. Наиболее просто собрать необходимые для прогнозирования данные в стационарных цеховых условиях [11]. Однако в условиях трассы сложно замерить целый ряд параметров процесса ручной и механизированной сварки. Например, перемещения руки сварщика и параметры колебаний электрода в разделке при ручной или механизированной сварке являются неконтролируемыми величинами. О них можно судить только по косвенным признакам.

Нельзя не учитывать влияние на качество формирования сварного шва сборки стыка, так как даже принятые отделом технического контроля (ОТК) собранные стыки будут иметь отклонения в пределах допуска. Если при автоматической орбитальной сварке для определения реального профиля свариваемых кромок можно использовать сканирующие лазерно-телевизионные системы [12], то при ручной и механизированной сварке применить их достаточно сложно. Поэтому прогнозирование качества ручной и механизированной сварки только по результатам обработки фактических значений энергетических параметров процесса может носить только оценочный, приближенный характер. Для повышения достоверности такого прогноза необходимы реальные данные о распределении размеров разделки кромок по стыку трубопровода. В тех случаях, когда применять лазерно-телевизионное сканирование невозможно, нужно использовать другие технологические приемы. Так, если пренебречь изменением зазора в ходе сварки вследствие теплового расширения и деформации металла, то мониторинг сборки стыка в ходе сварки можно заменить измерением его размеров до начала сварки. Так как величина зазора относительно медленно меняется вдоль стыка, то достаточно выполнить измерение в нескольких точках, а остальные размеры стыка определять интерполяцией имеющихся результатов. Есть ещё одна возможность повышения достоверности прогноза, когда учет параметров сварки затруднен. Можно учитывать их возможный разброс (например, допуск на диаметр проволоки, возможные вариации скоростей сварки и подачи проволоки, зазора в стыке и т. п.). Однако в этом случае на результат моделирования достаточно сложно наложить отклонения от нестабильности тех параметров, которые не измеряют.

Следует отметить, что вследствие флуктуаций параметров сварочного процесса показатели качества швов неравномерно распределяются как по длине, так и по толщине сваренного стыка. Поэтому конечной задачей модуля прогнозирования качества соединений является выявление именно тех участков шва, на которых вероятность ухудшения показателей качества критически высока. Очевидно, что столь сложная связь показателей качества с получаемыми результатами требует использования современных инструментов прогнозирования.

С учетом этого, прогнозируемые результаты могут быть описаны только динамической (нестационарной) физико-математической моделью. Принимая во внимание проблемы фиксации расширенного набора параметров, в модели должны использоваться приемы суррогатной оптимизации [13]. С учетом этих соображений, на рис. 3 приведена структура динамической физико-математической модели, используемой в составе модуля оперативного прогнозирования качества сварных соединений по минимальному числу анализируемых параметров.

Ввод данных:
материалы, тип стыка, номинальные параметры сварки и вероятные допуски на их значение.
Чтение баз данных:
Определение исходного термодинамического состояния.

Базы данных
по свойствам материалов, стандартных размеров стыка и шва.

Цикл реального времени

Учет формы и разделки кромок стыка

Внутренний итерационный цикл

Моделирование сварочного процесса:
- определение расположения дуги и распределения её мощности по поверхности стыка и сварочной ванны;
- определение распределения температур и размеров сварочной ванны;
- определение деформации поверхности сварочной ванны.

Ввод данных мониторинга:
- положение сварки,
- текущие размеры разделки,
- ток и напряжение дуги.

пока не достигнуто равновесное состояние поверхности сварочной ванны

Определение текущих значений размеров поперечного сечения и химического состава металла шва, его структуры и механических свойств.

Расчёт текущих значений напряжений и деформаций.

Оценка соответствия геометрии стыка и критериев качества шва нормативным требованиям.

База требований
к качеству продукции

Прогноз вероятности дефектов и вывод предупреждающих сообщений в ходе выполнения прохода.

пока не завершена сварка прохода шва

Вывод протокола о результатах прогнозирования вероятности возникновения дефектов в проходах свариваемого шва

Рис. 3. Структура физико-математической модели для прогнозирования результатов процессов сварки в составе интеллектуального модуля

Перед выполнением сварки в программу вводится информация о процессе: тип соединения и форма разделки, толщины свариваемых деталей, марка стали, марка и диаметр электродной проволоки, защитный газ, а также рекомендуемые режимы сварки. В дальнейшем эта информация приводится в паспортах на сваренные стыки, где также содержатся данные о номере стыка, серийном номере сварочного оборудования, фамилии сварщика, времени начала и окончания процесса сварки стыка.

Особенностью модели для выполнения прогноза качества в ходе сварки является необходимость синхронного с реальным процессом проведения расчетов, что реализуется в цикле реального времени с заданным шагом, определяемым по инерционности сварочной ванны. Поэтому он должен быть меньше длительности изменения глубины кратера на поверхности ванны при изменении тока дуги. Моделирование термодинамического состояния стыка должно осуществляться на каждом шаге реального временного цикла, так как важной особенностью дуговой сварки, помимо возможности заглубления дуги в кратер сварочной ванны, является изменение ее объема. С учетом этого, энергетический и массовый баланс должен быть достигнут за время, не превышающее выбранный шаг. По термодинамическому состоянию металла несложно определить размеры сварочной ванны, термический цикл сварки и химический состав шва, что позволяет выполнить расчёт количества структурных составляющих и оценить механические свойства металла шва и ЗТВ. Кроме того, известными методами [14] можно рассчитать напряжения и деформации в окрестности сварочной ванны.

Такие решения позволяют оценить не только возможность появления горячих трещин, но и по резуль-

татам расчета количества мартенсита, склонности металла шва и ЗТВ к холодным трещинам.

Встраивание физико-математической модели в компьютерную программу модуля оперативного прогнозирования позволяет оценивать вероятность возникновения дефектов непосредственно в ходе сварки (рис. 4).

Для достоверности результатов необходимо, чтобы скорость виртуального воспроизведения процесса была больше его реального течения. Поэтому главным препятствием успешного функционирования модуля оперативного прогнозирования является длительность численного решения уравнений физико-математической модели. Это обстоятельство вынуждает упростить как саму модель, так и её численную реализацию. Упрощение модели может быть достигнуто ограничением области её применения (специализацией), а также уменьшением количества измеряемых параметров и определяемых показателей качества. Однако, чтобы уменьшить погрешность виртуального воспроизведения при подобном упрощении, необходимо провести комплексные исследования по оценке влияния отдельных факторов и явлений на показатели качества сварных соединений.

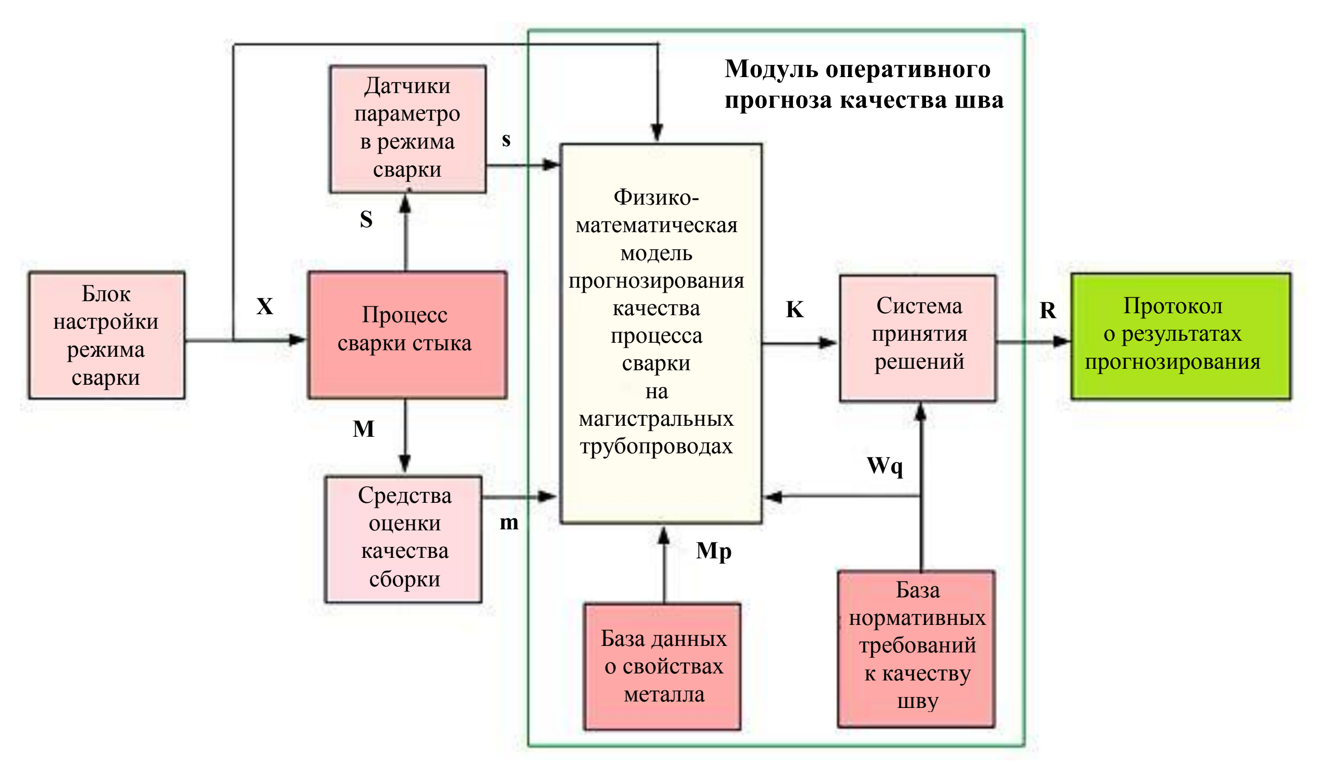


Рис. 4. Структура системы прогнозирования результатов процесса сварки:
X — заданные параметры сварочного процесса; S — контролируемые параметры сварочного процесса;
s — результаты измерения параметров сварки;
M — данные о геометрии, качестве сборки и пространственном положении стыка;
m — результаты измерений; Mp — данные о физических свойствах свариваемого металла;
Wq — нормативные данные о требованиях к качеству сварного шва;
Sp — база сравнения параметров режима; K — информационный поток;
R — сигнал результатов сопоставления качества шва нормативным требованиям

Разумеется, что структура интеллектуального модуля прогнозирования результатов процесса сварки, его программное обеспечение будут уточнены и скорректированы по результатам опытно-промышленного использования при оперативном прогнозировании качества сварных соединений непосредственно при выполнении сварочных работ.

Необходимый комплекс работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки и последовательность их выполнения представлены на рис. 5.



Рис. 5. Содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки

Для диагностирования технического состояния магистральных трубопроводов необходимо собрать всю доступную информацию об объекте. Для этого информация по прогнозированию качества сварных соединений должна поступать в систему управления качеством трубопроводов более высокого уровня, например, в систему комплексного диагностического мониторинга линейной части магистральных газопроводов [15], либо в систему анализа информации о состоянии элементов нефтепроводов [16, 17]. Строительным организациям важна информация не только о дефектах сварных соединений, но и о причинах их возникновения. Поэтому информация оперативного прогнозирования качества сварных соединений должна анализироваться строительными организациями с целью выработки профилактических мер по совершенствованию организации и выполнению сварочных работ. Такой анализ целесообразно осуществлять в стационарных условиях, с включением в структуру модуля прогнозирования более полной компьютерной модели сварочного процесса и накопителя информации с соответствующими фильтрами. Однако и этот подход нуждается в дополнительном исследовании значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Только тогда информация оперативного прогнозирования качества сварных соединений станет по настоящему эффективным инструментом принятия профилактических мер по предупреждению и устранению причин брака.

Выводы

1. Предложен метод обработки данных мониторинга процесса сварки с использованием детерминированной физико-математической модели, обеспечивающей достаточно точный прогноз качества сварных соединений непосредственно в ходе сварки, на основе взаимосвязей между параметрами режима и нормируемыми показателями качества соединений.

2. Оперативное прогнозирование обеспечивает специальный интеллектуальный модуль, в программное обеспечение которого входит компьютерная программа реализации физико-математической модели оперативного прогнозирование качества сварных соединений.

3. Так как главным препятствием использования предложенного метода оперативной обработки данных являются высокие требования к скорости решения уравнений модели, то для обеспечения высокой скорости виртуального воспроизведения процесса сварки предлагается провести комплексные исследования значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Эти соображения определили содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки.

Библиографический список

1. Мустафин, Ф. М. Современные технологии сварки трубопроводов: учебное пособие / Ф. М. Мустафин, Н. Г. Блехерова, Л. И. Быков. — Санкт-Петербург : Недра, 2010. — 560 с.

2. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О. Б. Гецкин [и др.] // Сварка и Диагностика. — 2010. — № 6. — С. 51–57.

3. Реализация адаптивных технологий сварки кольцевых стыков магистральных трубопроводов / Н. П. Алешин [и др.] // Сварка и Диагностика. — 2011. — № 5. — С. 49–53.

4. Алешин, Н. П. Современные способы сварки: учебное пособие / Н. П. Алешин, В. И. Лысак, В. Ф. Лукьянов. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 58 с.

5. Гладков, Э. А. Регистратор параметров сварки / Э. А. Гладков // Сварочное производство. — 2000. — № 3. — С. 46–47.

6. Гаврилов, А. И. Видеокомпьютерные технологии построения компактных моделей протяженных сварных швов в системах автоматизированного мониторинга качества при строительстве магистральных трубопроводов / А. И. Гаврилов, Э. А. Гладков, Р. А. Перковский // Сварка и Диагностика. — 2014. — № 1. — С. 57–61.

7. Kuvin, B. F. Captured: Real-Time welding data to optimize quality, efficiency / B. F. Kuvin, L. A. Kren // MetalForming magazine. — 2016. — Vol. 50, no. 3. — P. 40–43.

8. On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding / S. Adolfsson [et al.] // Welding Journal. - 1999. — Vol. 78, no. 2. — P. 59s–73s.

9. Monitoring and control of penetration in GTAW and pipe welding / X. R. Li [et al.] // Welding Journal. — 2013. — Vol. 92, no. 6. — P. 190s–196s.

10. Choi, J. H. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system / J. H. Choi, J. Y. Lee, C. D. Yoo // Welding Journal. — 2001. — Vol. 80, no. 10. — P. 239s–245s.

11. Control of the weld quality using welding parameters in a robotic welding process / M.-H. Park [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2018. — Vol. 87, no. 1. — P. 32–40.

12. Булычев, В. В. Способы и средства мониторинга и автоматизации сварочных процессов: учебное пособие / В. В. Булычев. — Калуга : Манускрипт, 2018. — 44 с.

13. Leifsson, L. Surrogate modelling and optimization using shape-preserving response prediction: a review / L. Leifsson, S. Koziel // Journal Engineering Optimization. — 2015. — Vol. 48, no. 3. — P. 476–496.

14. Determination of welding parameters for shielded metal arc welding / U. Soy [et al.] // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6, no. 15. — P. 3153–3160.

15. Харионовский, О. В. Мониторинг объектов линейной части магистральных газопроводов / О. В. Харионовский // Территория Нефтегаз. — 2009. — № 4. — С. 22–25.

16. Лисин, Ю. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях / Ю. В. Лисин, А. А. Александров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2013. — № 2. — С. 22–27.

17. Создание, внедрение и сопровождение архива электронных копий и оцифрованных данных трассы магистрального нефтепровода / В. И. Суриков [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2015. — № 4. — С. 52–60.

Сдана в редакцию 14.01.2020
Запланирована в номер 05.03.2020

Об авторах:

Филяков Алексей Евгеньевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, РФ, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9051-7078 , filyakov.92@mail.ru

Шолохов Михаил Александрович, заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация сварочного производства», ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7666-5645, uni@shtorm-its.ru

Заявленный вклад соавторов

А. Е. Филяков — постановка цели и задач исследования, проведение литературного анализа, подготовка текста, формирование выводов; М. А. Шолохов — научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-51-60

К вопросу о моделировании процесса зарождения мартенсита на кластерах ферромагнитной природы



Ю. В. Долгачев, В. Н. Пустовойт, И. О. Филоненко, И. В. Иванков
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Изучение магнитного состояния аустенита сталей позволило выявить механизм воздействия внешнего магнитного поля на сталь в процессе закалки. Предыдущие исследования установили положительное практическое влияние термической обработки в магнитном поле.
Цели работы: создать компьютерную модель магнитного состояния аустенита углеродистой стали; провести вычислительные эксперименты с системой спинов при различных значениях температуры и внешнего магнитного поля.
Материалы и методы. Использованы положения модели Изинга. Канонический ансамбль спинов моделировался методом Монте-Карло с использованием алгоритма Метрополиса.
Результаты исследования. Алгоритм реализовывался при начальных параметрах, подобранных с учетом экспериментальных данных о магнитном состоянии аустенита. Изучались неоднородности этого состояния без воздействия магнитного поля. Получены данные о размерах ферромагнитных кластеров в аустените при различных температурах. Отмечено, что наличие внешнего магнитного поля противодействует температурному разупорядочиванию спинов. Получены данные об увеличении размеров ферромагнитных кластеров при росте напряженности магнитного поля.
Обсуждение и заключения. Разработана двумерная компьютерная модель спинового состояния аустенита углеродистой стали. Вычислительные эксперименты при различных параметрах модели показали, что выше температуры Кюри существует ближний порядок в расположении спинов. С увеличением температуры системы размеры упорядоченных областей уменьшаются, а при наложении внешнего магнитного поля увеличиваются.

Ключевые слова: закалка, сталь, магнитное поле, мартенсит, мартенситное превращение, аустенит.

Для цитирования: К вопросу о моделировании процесса зарождения мартенсита на кластерах ферромагнитной природы / Ю. В. Долгачев, В. Н. Пустовойт, И. О. Филоненко, И. В. Иванков // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 51−60. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-51-60



On modeling the martensite nucleation on ferromagnetic clusters

Yu. V. Dolgachev, V. N. Pustovoit, I. O. Filonenko, I. V. Ivankov
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The study of the austenite magnetic state in steels has provided the mechanism of the external magnetic field impact on steel under the hardening process. Previous studies have established a positive practical effect of heat treatment in a magnetic field. The work objectives were to create a computer model of the magnetic state of carbon steel austenite; to conduct computational experiments with a system of spins at various values of temperature and external magnetic field.
Materials and Methods. The positions of the Ising model were used. The canonical ensemble of spins was modeled by the Monte Carlo method using the Metropolis algorithm.
Results. The algorithm was implemented with the initial parameters selected through experimental data on the magnetic state of austenite. The inhomogeneity of this state without exposure to a magnetic field was studied. Data on the sizes of ferromagnetic clusters in austenite at various temperatures were obtained. It has been noted that the presence of an ex-

ternal magnetic field counteracts the temperature disordering of spins. Data on an increase in the size of ferromagnetic clusters under growing magnetic field strength were obtained.
Discussion and Conclusions. A two-dimensional computer model of the spin state of austenite of carbon steel has been developed. The computational experiments with various parameters of the model have shown that there is a short-range order in the arrangement of spins above the Curie temperature. With a rise of the temperature of the system, the sizes of ordered regions decrease; but when an external magnetic field is applied, they increase.

Keywords: quenching, steel, magnetic field, martensite, martensitic transformation, austenite.

For citation: Yu.V. Dolgachev, V.N. Pustovoit, I.O. Filonenko, I. V. Ivankov. On modeling the martensite nucleation on ferromagnetic clusters. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 51-60. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-51-60

Введение. Изучается магнитное состояние аустенита сталей и влияние, которое может оказать на него внешнее постоянное магнитное поле. Предыдущие исследования показали, что термическая обработка в магнитном поле имеет положительное практическое значение [1–4], поэтому представляется актуальным изучение механизмов такого воздействия.

К. Зинер [5] указывал на необходимость учитывать роль магнитных превращений при рассмотрении мартенситных переходов в сплавах на основе железа. В расчете термодинамических характеристик мартенситного превращения он использовал два параметра — магнитную и немагнитную составляющие изменения свободной энергии чистого железа.

Ряд исследователей [6–8] обнаружили отклонение температурной зависимости обратной магнитной восприимчивости от линейного закона Кюри — Вейса в парамагнитной области некоторых сталей. При этом ход кривой удовлетворительно описывался функцией Ланжевена для суперпарамагнетиков. Такое изменение магнитных свойств аустенита сталей связано с самопроизвольными флуктуациями дальнего ферромагнитного порядка.

Эксперименты [9, 10] доказали существование ближнего порядка спинов (т. н. «роев») выше температуры Кюри с помощью магнитной дифракции нейтронов.

Постоянное магнитное поле в процессе закалочного охлаждения воздействует на области с упорядоченным расположением спинов в аустените и на их взаимодействие. В результате инициируется зарождение мартенситных кристаллов на ферромагнитных кластерах.

Материалы и методы. На данный момент существует только один точный и подробный метод экспериментальных исследований «роев» спинов — магнитная дифракция нейтронов. В данной работе магнитное состояние аустенита углеродистой стали изучено посредством вычислительного эксперимента. Применены положения модели Изинга [11–13]. Методом Монте-Карло [14–16] смоделирован канонический ансамбль[1] спинов, использование которого позволяет моделировать поведение системы спинов при постоянной температуре. Для получения произвольного неравномерного распределения вероятности задействован алгоритм Метрополиса [17] — частный случай процедуры выборки по значимости, когда некоторые возможные выборки отбрасываются.

Модель Изинга используется для моделирования фазовых переходов в магнитных веществах или бинарных сплавах. Эта решеточная модель учитывает взаимодействия между ближайшими узлами. Спины представляются магнитными моментами атомов в узлах решетки, которые взаимодействуют друг с другом и внешним магнитным полем (при его наличии).

Модель Изинга базируется на следующих упрощениях:
— не учитывается кинетическая энергия узлов решетки;
— при вычислении энергии взаимодействия спинов учитываются только ближайшие соседи;
— предусмотрены только два возможных состояния спинов (положительное ↑ или отрицательное↓ направление вдоль оси z).

[1] Канонический ансамбль — статистический ансамбль, отвечающий особой физической системе. Она обменивается энергией с окружающей средой (термостатом), находясь с ней в тепловом равновесии, но не обменивается веществом, поскольку отделена от термостата непроницаемой для частиц перегородкой. Для сокращенного описания такой системы используют два параметра: число частиц N и средняя энергия E [13].

Как показано в [18], изучение классической двумерной модели Изинга позволяет выявить общие закономерности поведения магнитных систем вблизи температуры фазового перехода, даже несмотря на принятые упрощения.

При использовании модели Изинга изучались такие макроскопические характеристики системы, как средняя энергия $\langle E\rangle$, средняя намагниченность $\langle M\rangle$, удельная теплоемкость C и магнитная восприимчивость χ. При вычислениях средних значений по всем конфигурациям системы учитывался период до достижения системой состояния релаксации, который исключался из подсчетов[2].

Результаты исследования. Опишем полную энергию системы двумерных спинов в модели Изинга с учетом возможного магнитного поля h:

$$E = -J\sum_{\langle i,j\rangle}^{N} s_i s_j - h\sum_{i=1}^{N} s_i.$$

Здесь J — константа обменной связи, которая характеризует силу взаимодействия соседних спинов. N — число всех спинов; $\langle i,j\rangle$ означает суммирование по всем ближайшим парам спинов. С каждым i-м узлом решетки связано число s_i. Оно характеризует направление магнитного момента и может принимать значения либо +1 (если спин ориентирован в положительном направлении оси z), либо –1 (если спин ориентирован в отрицательном направлении оси z).

Если значение константы обменного взаимодействия больше нуля, то однонаправленное состояние двух соседних спинов энергетически выгоднее, т. е. состояние с наименьшей полной энергией является ферромагнитным. В ином случае более предпочтительным будет состояние, когда соседние спины антипараллельны друг другу (антиферромагнитное состояние).

Наложение внешнего магнитного поля вдоль оси z прибавляет или отнимает дополнительную внутреннюю энергию спинов соответственно их направлению по оси z.

В дальнейших рассуждениях о термодинамических характеристиках системы энергии J и h будут измеряться в единицах температуры. Это удобно при рассмотрении взаимодействия между спинами, т. к. при нагревании системы связи между ними ослабевают.

Найдем соотношение, связывающее удельную теплоемкость C и флуктуации энергии системы в каноническом ансамбле:

$$C = \frac{1}{T^2}\left(\langle E\rangle^2 - \langle E^2\rangle\right).$$

Намагниченность M системы вычислялась сложением всех значений s_{ij} в данной конфигурации. Затем вычислялась средняя намагниченность $\langle M\rangle$ по всем конфигурациям системы.

Магнитная восприимчивость χ при данной температуре:

$$\chi = \frac{1}{T}\left(\langle M^2\rangle - \langle M\rangle^2\right).$$

Возможные конфигурации системы спинов будут определяться значениями 2^N спиновых чисел s. Применяя алгоритм Метрополиса, можно сгенерировать спиновые конфигурации S с вероятностью $w(S)$, а затем усреднить искомые величины по всем конфигурациям. Рассматривались конфигурации, отличающиеся между собой переворотом одного спина. Принятие решения о перевороте того или иного спина (т. е. о принятии пробной конфигурации S_p) зависело от соотношения весовых функций:

$$r = \frac{w(S_p)}{w(S)} = e^{-\frac{E_{S_p}}{T}} \cdot e^{\frac{E_S}{T}},$$

где E_s и E_{Sp} — энергии систем с конфигурациями спинов S и S_p соответственно.

Спин s_{ij} переворачивался и принималась новая конфигурация, если $r > 1$ или $r < 1$, но больше, чем случайное число, сгенерированное с учетом равномерного распределения на отрезке от 0 до 1. В противном случае спин оставался неизменным. На одном шаге Монте-Карло предпринимается число попыток переворота, равное числу спинов системы N.

Для двумерного случая выбраны тороидальные краевые условия: решетка представляется кольцом, в котором спины, находящиеся на правой границе исходной квадратной решетки, взаимодействуют со спинами, находящимися на левой границе. Аналогичное кольцевое взаимодействие предусмотрено для верхней и нижней границ. Это обеспечивает одинаковое число взаимодействий для всех спинов. Взаимодействие любого спина с соседями может быть рассмотрено как взаимодействие с одним спином, величина которого равна сумме величин четырех соседних спинов (она может равняться 0, ±2 или ±4). В двумерном случае минимально возможное значение изменения энергии при опрокидывании рассматриваемого (центрального) спина составляет 4J.

Алгоритм и начальные параметры реализации модели магнитного состояния аустенита. Структура алгоритма и основные функции, разработанные при его реализации, выполнены в математическом пакете с учетом рекомендаций [19].

Модель была реализована путем последовательного выполнения перечисленных ниже операций.

[2] Далее по тексту, если речь идет о конфигурациях системы, подразумеваются конфигурации после достижения системой состояния релаксации.

1. Задание начальных условий: числа спинов системы N, константы обменного взаимодействия J, напряженности внешнего магнитного поля h, температуры T, числа шагов метода Монте-Карло N_t (аналог времени).
2. Выполнение функции, создающей начальную конфигурацию системы с учетом заданных N, J, h.
3. Вычисление мгновенных конфигураций системы на каждый шаг N_t с учетом N, J, h и начального состояния системы.
4. Визуализация:

— мгновенных конфигураций системы в интересующие моменты,

— зависимости мгновенной энергии системы от времени,

— зависимости мгновенной намагниченности системы от времени.

Наблюдая конфигурации спинов, можно оценить текущее магнитное состояние системы. Изучение указанных зависимостей от времени позволяет оценить необходимое время релаксации системы τ для учета его в последующих вычислениях.

5. Вычисление средней энергии системы $\langle E\rangle$, удельной теплоемкости C, магнитной восприимчивости χ и средней намагниченности $\langle M\rangle$.
6. Вычисление параметров, характеризующих размеры ферромагнитно-упорядоченных областей: средний размер, максимальный размер, минимальный размер, среднеквадратичное отклонение по размерам. (Вычисление идет по набору спиновых конфигураций.)

Алгоритм реализован при начальных параметрах, подобранных с учетом экспериментальных данных о магнитном состоянии аустенита [8, 20]. Температура точки Кюри железоуглеродистого аустенита стали У8 составляет ~180 К, т. е. если бы удалось сохранить решетку аустенита до этой температуры, то ниже точки Кюри аустенит получил бы ферромагнитные свойства. Константа обменного взаимодействия двумерной модели подбиралась таким образом, чтобы система испытывала магнитный фазовый переход при данной температуре. Значение константы обменного взаимодействия для двумерного случая не совпадает с реальным значением этой константы для железоуглеродистого сплава. Однако в рамках двумерной модели подобраны следующие параметры: $N = 625$, $J = 0{,}78$, $h = 0$, $N_t = 2500$. Благодаря этому при моделировании в интервале температур, включающих область точки Кюри аустенита, наблюдались эффекты, полностью аналогичные эффектам реальной системы, испытывающей фазовый магнитный переход из парамагнитного состояния в ферромагнитное, а именно:

— максимумы удельной теплоемкости и магнитной восприимчивости в точке Кюри,

— резкое уменьшение средней намагниченности при фазовом переходе,

— расхождение между кривой намагниченности и кривыми удельной теплоемкости и магнитной восприимчивости при переходе в ферромагнитное состояние (рис. 1).

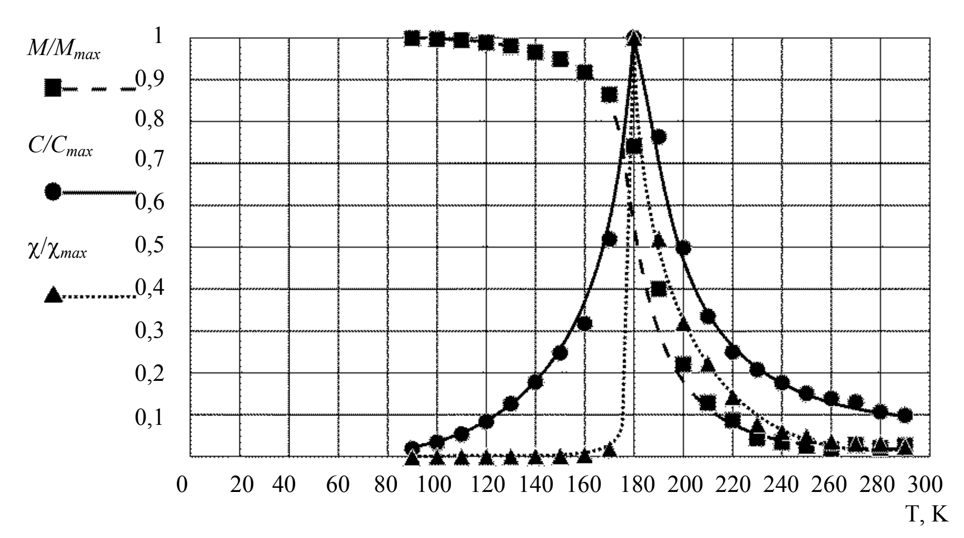


Рис. 1. Поведение свойств стали У8 около ферромагнитной точки Кюри аустенита по итогам вычислительных экспериментов

На рис. 1 видно, что намагниченность не падает до нуля в точке Кюри. Остатки «аномалий» выше точки Кюри неоднократно наблюдались экспериментально [6–10, 19]. Л. Д. Ландау [12] и другие исследователи [6, 8, 9, 19] объясняли это флуктуациями порядка при $T > \Theta$. Флуктуации самопроизвольной намагниченности должны особенно резко сказываться вблизи точки Кюри, ибо в самой точке Кюри они стремятся к бесконечности.

На рис. 2 схематически изображена температурная зависимость параметра ближнего порядка σ из [19].

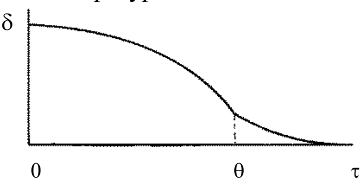


Рис. 2. Температурная зависимость параметра ближнего магнитного порядка [19]

Вблизи температуры Кюри σ резко уменьшается, а при $T > \Theta$ асимптотически стремится к нулю. Такая «нерезкость» температуры Кюри с точки зрения ближнего порядка предопределяет следующее явление: все аномалии ферромагнетиков имеют крутой максимум в точке Кюри, однако при $T > \Theta$ не должны сразу идти в ноль, а лишь постепенно убывают в соответствии с постепенным разрушением порядка на близких расстояниях.

Как показано в [19], энергия обменного взаимодействия часто обусловливает силы, заметно действующие именно на близких расстояниях. Поэтому термодинамически равновесное состояние ферромагнетика должно определяться ближним порядком между спинами. Это частный случай общей задачи кооперативного поведения взаимодействующих атомов (например, при фазовом переходе первого рода).

Ферромагнетизм во многом квантовое явление [15]. Тем не менее даже в рамках классического статистического подхода теория с учетом порядка на близких расстояниях, безусловно, полезна в иллюстративном и качественном отношении [15, 19].

Л. С. Стильбанс учел «магнитный порядок» на близких расстояниях в схеме Изинга [21] и теоретически объяснил «остатки» аномалии теплоемкости при температурах выше точки Кюри. Аномальная теплоемкость обусловлена необходимостью разрушения порядка на ближних расстояниях, который частично сохраняется и выше точки Кюри.

Этот метод развивал С. В. Вонсовский [22–24]. Он теоретически показал различия между ферромагнитной и парамагнитной точками Кюри. Итоги его работ доказывают, что парамагнитная восприимчивость вблизи точки Кюри имеет конечное значение, а не стремится к бесконечности, как это следует из теории без учета ближнего порядка.

Такой большой интерес к упрощенной Изинговой модели объясняется тем, что обращение к ней позволяет разрешить принципиальные трудности, возникающие при теоретической трактовке фазовых переходов второго рода.

Анализ областей с ближним ферромагнитным порядком в аустените с помощью вычислительного эксперимента. В данном разделе изучаются неоднородности магнитного состояния аустенита без внешнего воздействия магнитным полем.

Для визуализации мгновенной спиновой конфигурации системы в выбранные моменты спины представлены белыми и черными квадратами. Белые квадраты — спины, ориентированные в положительном направлении оси z (например, под действием обменных сил и (или) приложенного внешнего магнитного поля). Черные квадраты — спины, ориентированные в отрицательном направлении оси z (рис. 3).

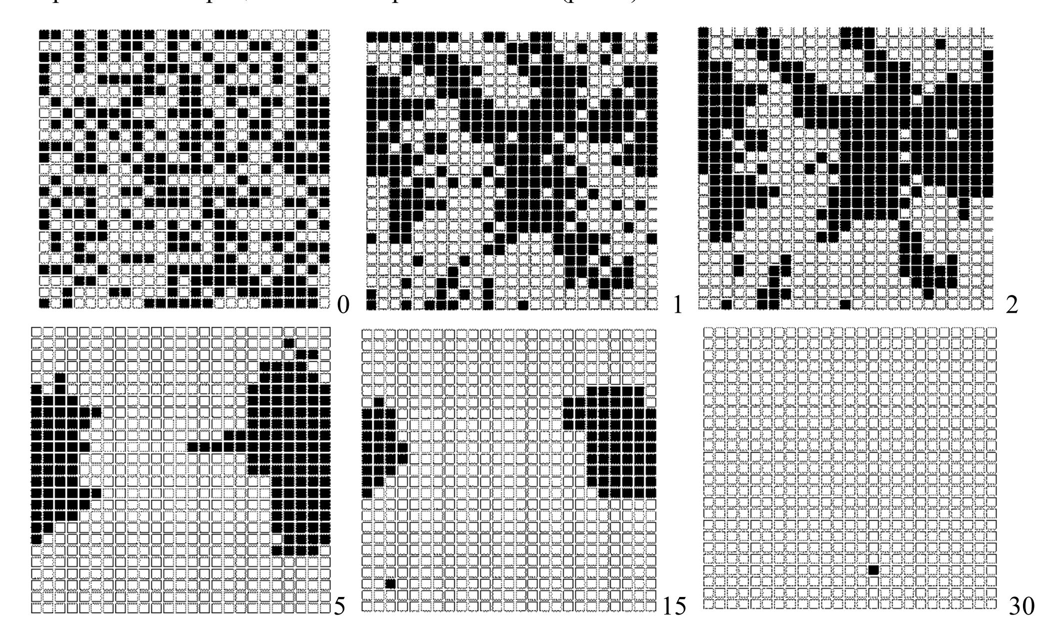


Рис. 3. Мгновенные конфигурации системы в выбранные моменты (T = 100 К, h = 0)

На рис. 3 представлены визуализации системы при температуре 100 К (т. е. ниже точки Кюри) без действия магнитного поля в различные моменты. Ниже приводится интерпретация этих конфигураций.

— В момент времени 0 система находится в исходном состоянии, которое инициировано с помощью генератора случайных значений (полностью разупорядоченное состояние).

— Переход к моменту 1 означает, что каждый спин системы ($N = 625$) был рассмотрен для принятия решения о его перевороте согласно описанным выше условиям.

— К третьему шагу каждый спин был трижды рассмотрен на предмет переворота.

— Последующие моменты показывают, что система стремится к состоянию с ферромагнитным порядком.

— На 30-м шаге фиксируется полностью упорядоченное состояние (за исключением одного спина). Подобная картина (с небольшими флуктуациями 1÷3 спинов) наблюдается во все последующие моменты. Всего шагов $N_t = 2500$. Следовательно, система пришла в устойчивое состояние (т. е. стадия релаксация завершена ранее 30-го шага).

Надо заметить, что описанная картина характерна для текущей генерации модели с заданными условиями. При формировании модели используется генератор случайных чисел, поэтому результаты пересчета будут отличаться в деталях, но качественно модель всегда ведет себя подобным образом при одинаковых начальных условиях.

Рассмотрим графики зависимости мгновенных значений энергии (рис. 4 *а*) и магнитного момента (рис. 4 *б*) системы от времени.

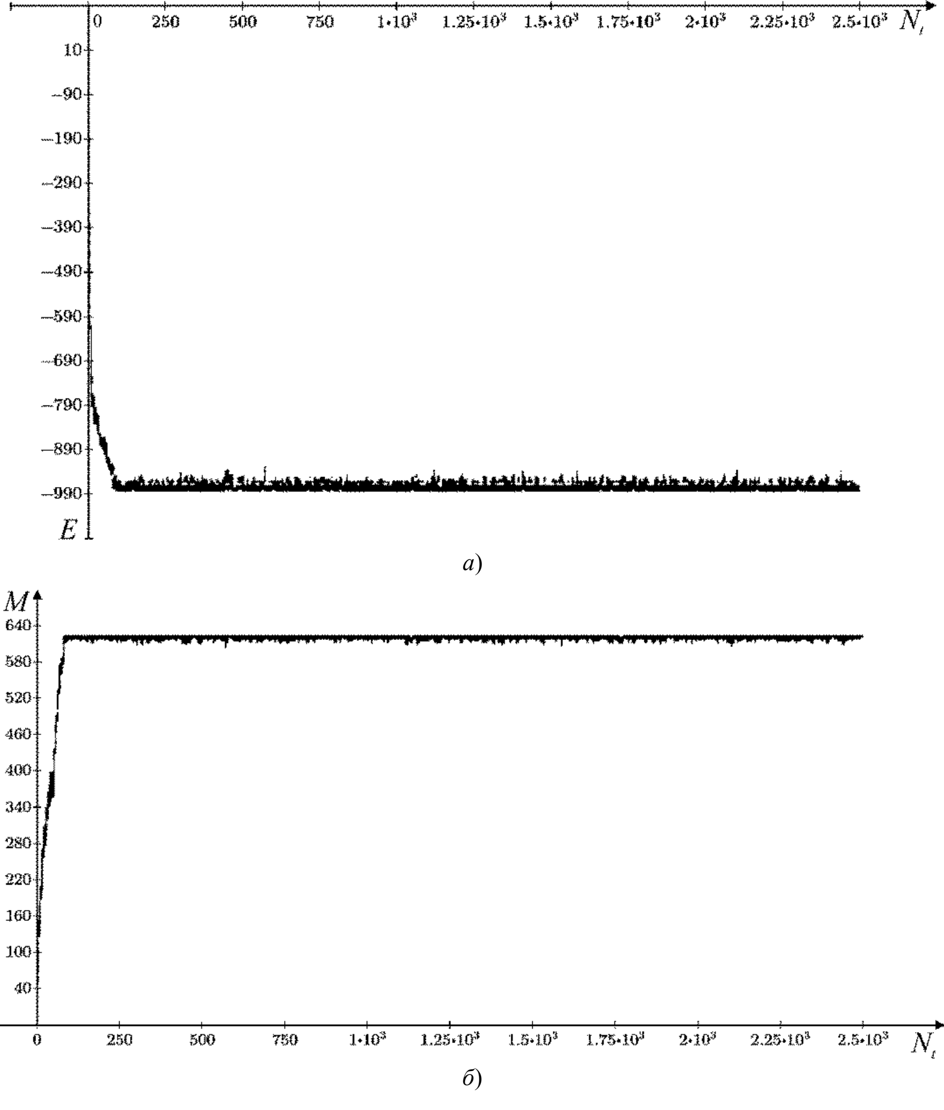


Рис. 4. Зависимость мгновенных значений полной энергии системы (*а*) и магнитного момента (*б*) от времени

Из рис. 4 видно, что система быстро стремится к состоянию равновесия (процесс релаксации). После перехода системы в состояние равновесия отмечаются лишь небольшие флуктуации. При достижении равновесия для данной температуры по конфигурациям системы статистически вычислялись макропараметры (средняя энергия, намагниченность, магнитная восприимчивость, удельная теплоемкость). Для этого по соответствующим графикам оценивалось отношение времени релаксации статической системы к состоянию равновесия. Отсекались начальные конфигурации системы в течение 400 шагов (16 % от всего времени вычисления), что с запасом перекрывало стадию релаксации системы, которая не превышала 150 шагов (рис. 4).

При закалке стали У8 мартенситное превращение начинается при температуре ~500 К. Интересно исследовать поведение модели вблизи этой температуры, т. к. при закалке в магнитном поле именно здесь проявляется действие поля, инициирующее фазовый переход. Естественно, при данной температуре устойчивым будет парамагнитное состояние аустенита, что и показала модель. Однако в спиновом состоянии аустенита наблюдаются нанообласти с ближним порядком в расположении спинов [9], которые играют существенную роль при воздействии внешнего магнитного поля [8] (воздействие поля проявляется во влиянии на размеры и устойчивость таких областей, но они существуют и без внешнего поля).

Для получения наиболее достоверных статистических данных о ферромагнитно-упорядоченных областях в аустените моделировалась система с максимально возможным (по техническим ограничениям оперативной памяти и быстродействия процессора) числом (N = 10000) спинов при температурах от 100 до 500 К. Другие начальные условия остались прежними.

На рис. 5 представлены результаты измерения упорядоченных областей в аустените. Размер определялся по количеству атомов, приходящихся на горизонтальные и вертикальные сечения упорядоченной области: $\overline{L}$ — средний размер, *Max* — максимальный, *Min* — минимальный, σ — среднеквадратичное отклонение.

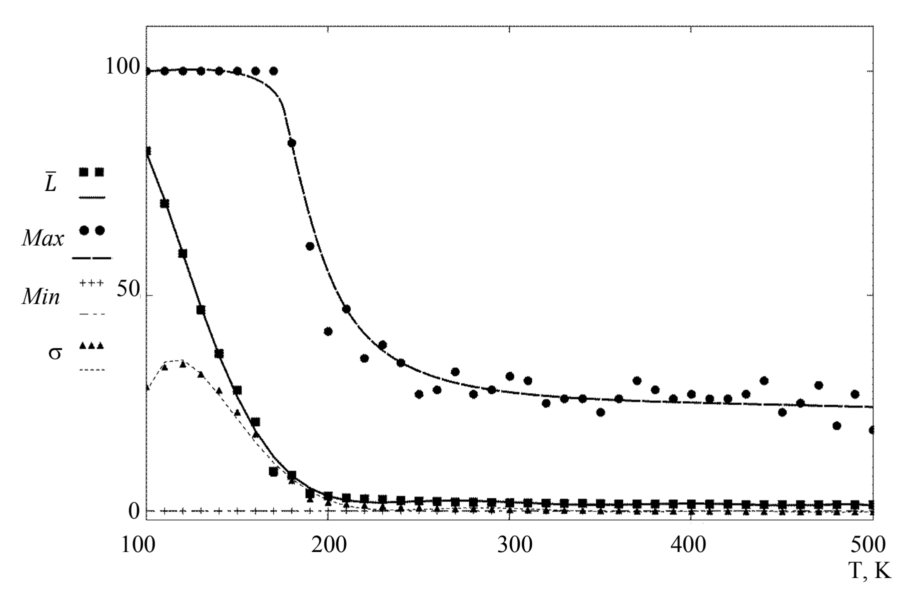


Рис. 5. Зависимость от температуры размеров областей
с ферромагнитным порядком в аустените

Согласно полученным данным, флуктуации ближнего магнитного порядка в стали У8 сохраняются до температур около 500 К, когда при закалке стали начинается мартенситное превращение. При этом максимальные размеры таких областей в аустените при температуре 500 К могут достигать 20 атомов в сечении (~7,2 нм). Максимальный размер при температурах в области точки Кюри и ниже ограничен условиями модели и не превышает 100 атомов (т. е. максимального поперечного размера моделируемой области). Наблюдаемые колебания на кривой максимального размера кластера связаны с использованием в модели генератора случайных чисел.

В теории Вейса учитывается только порядок на дальних расстояниях [19], который определяется разностью количества спинов, противоположно направленных по всему домену, независимо от их детального взаимного расположения. При этом получается, что ближний порядок просто приравнивается к дальнему, т. е. числа ближайших соседей разной ориентации у любого спина предполагаются пропорциональными полным числам разнонаправленных спинов в домене. Таким образом, локальная намагниченность ближайших соседей у каждого спина равна намагниченности, рассчитанной по всему кристаллу. В реальном кристалле наблюдается другая картина: параллельные спины под действием обменных сил стремятся объединяться в отдельные «рои» [9, 19],

подобно атомам газа при его конденсации или образованию флуктуаций в неидеальном газе. Как видно из рис. 5, при низких температурах эти флуктуации очень велики. При высоких температурах более обоснованно приближение, не учитывающее ближний порядок. Однако и в этом случае имеются еще флуктуации параллельных спинов в малых объемах, вызываемые силами обмена и приводящие к отличной от нуля локальной намагниченности в отсутствие результирующего магнитного момента во всем объеме (т. е. в отсутствие дальнего порядка).

Таким образом, модель предсказывает существование областей с ближним магнитным порядком в аустените стали У8 перед мартенситным превращением. В этих областях, с большой долей вероятности, и возникают зародыши мартенсита. Кластеры с ферромагнитным упорядочением могут накладываться на дефекты кристаллической решетки и области неустойчивости кристаллической решетки [4], возникающие перед фазовым переходом. В этом случае вероятность зарождения мартенсита особенно высока.

Добавление внешнего магнитного поля в модель магнитного состояния аустенита. Наличие внешнего магнитного поля противодействует температурному разупорядочиванию спинов. На рис. 6 приведены зависимости параметров кластеров в аустените с ближним порядком (параметры те же, что и на рис. 5) от напряженности внешнего магнитного поля для стали У8 при температуре 500 К.

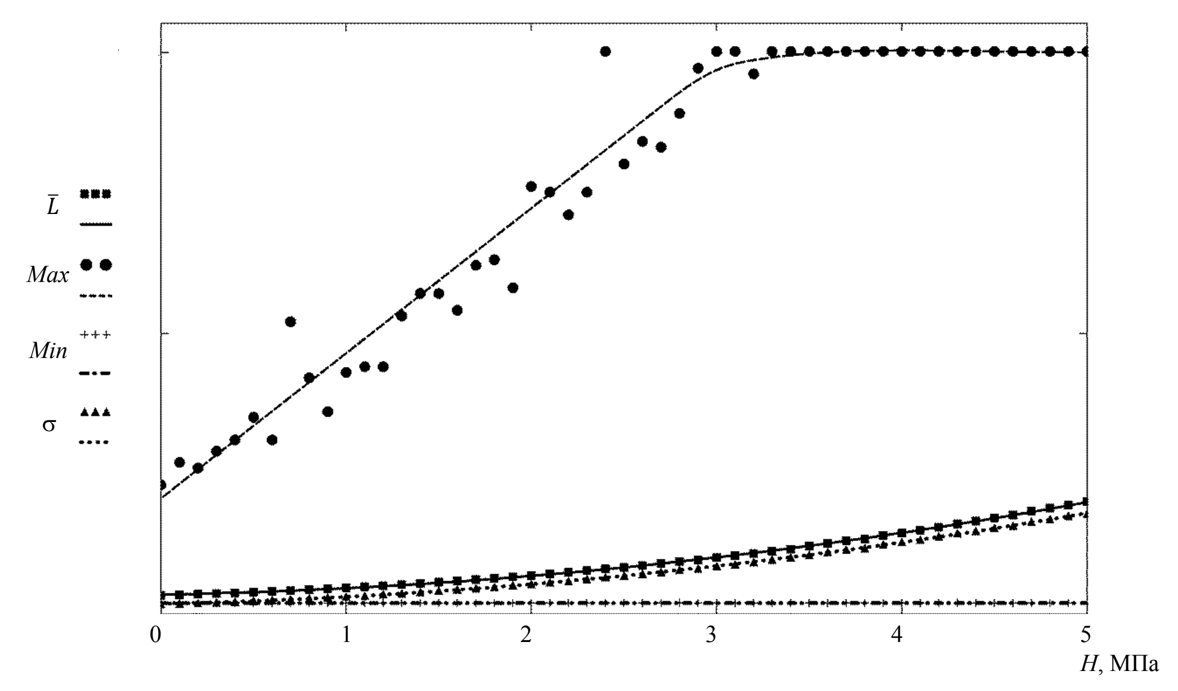


Рис. 6. Зависимость размеров областей с ферромагнитным порядком в аустените от напряженности внешнего магнитного поля при температуре 500 К

Как видно из рис. 6, с увеличением напряженности магнитного поля размеры кластеров растут вплоть до состояния полного магнитного упорядочивания при большой напряженности магнитного поля. Таким образом, при закалке в магнитном поле расширяются области с ближним порядком. При этом вероятность зарождения мартенсита выше, а число мест зарождения больше.

Обсуждение и заключение. Разработана двумерная компьютерная модель спинового состояния аустенита углеродистой стали У8. Вычислительные эксперименты при различных параметрах модели показали, что выше температуры Кюри существует ближний порядок в расположении спинов. С увеличением температуры системы размеры упорядоченных областей уменьшаются, однако даже при температуре начала мартенситного превращения (500 К) возможны флуктуации ближнего порядка максимальным размером ~7 нм. При наложении внешнего магнитного поля и усилении его напряженности увеличиваются размеры кластеров с ферромагнитным упорядочением. С помощью представленной модели в будущих работах предполагается более подробно исследовать влияние магнитного поля на характеристики роев спинов, их количество, время жизни и особенности взаимодействия.

Библиографический список

1. Пустовой, В. Н. Технология бездеформационной закалки в магнитном поле тонкостенных деталей кольцевой формы / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11, № 7 (58). — С. 1064–1071.

2. Сверхпластичность стали в температурном интервале Мд-Мн как стимул для «внутренней» магнитной правки / В. Н. Пустовойт, А. В. Бровер, М. Г. Магомедов, Ю. В. Долгачев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2006. — № 56. — С. 42–46.

3. Pustovoit, V. N. Distortion-free heat treatment of thin rods in magnetic field / V. N. Pustovoit, Y. V. Dolgachev // Materials Performance and Characterization. — 2019. — Vol. 8 (2). — P. 320–324. DOI: https://doi.org/10.1520/MPC20170159.

4. Пустовойт, В. Н. Зарождение мартенсита в условиях сверхпластичности аустенита и воздействия внешнего магнитного поля / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2016. — № 2 (181). — С. 114–120.

5. Zener, C. Impact of Magnetism upon Metallurgy / C. Zener // JOM. — 1955. — Vol. 7 (5). — P. 619–630. DOI: https://doi.org/10.1007/BF03377550.

6. Voronchikhin, L. D. Anomalous superparamagnetism of the γ phase of the Fe-Cr-Ni alloy / L. D. Voronchikhin, L. N. Romashev, I. G. Fakidov // Soviet Physics-Solid State. — 1975. — Vol. 16 (9). — P. 1708–1711.

7. Ромашев, Л. Н. Изменение магнитных свойств стали вблизи мартенситной точки / Л. Н. Ромашев, Л. Д. Ворончихин, И. Г. Факидов // Физика металлов и металловедение. — 1973. — Т. 36, № 2. — С. 291.

8. Pustovoit, V. N. Ferromagnetically ordered clusters in austenite as the areas of martensite formation / V. N. Pustovoit, Y. V. Dolgachev // Emerging Materials Research. — 2017. — Vol. 6, no. 2. — P. 249–253. DOI: https://doi.org/10.1680/jemmr.17.00042.

9. Spooner, S. Spin correlations in iron / S. Spooner, B. L. Averbach // Physical Review. — 1966. — Vol. 142 (2). — P. 291–299. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRev.142.291.

10. Bozorth, R. M. Magnetic Properties of Metals and Alloys / R. M. Bozorth. — Cleveland : American Society for Metals, 1959. — 349 p.

11. Ising, E. Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus / E. Ising // Zeitschrift für Physik. — 1925. — Vol. 31 (1). — P. 253–258. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02980577.

12. Landau, L. D. Statistical Physics. Vol. 5 / L. D. Landau, E. M. Lifshitz. — Oxford : Elsevier, 2013. — 544 p.

13. Hill, T. L. An Introduction to Statistical Thermodynamics / T. L. Hill. — New York : Courier Corporation, 1986. — 508 p.

14. Binder, K. Monte Carlo Methods in Statistical Physics / K. Binder. — Berlin : Springer Science & Business Media, 2012. — 416 p.

15. Dyson, F. J. Phase Transitions in Quantum Spin Systems with Isotropic and Nonisotropic Interactions / F. J. Dyson, E. H. Lieb, B. Simon // Journal of Statistical Physics. — 1978. — Vol. 18 (4). — P. 335–383. DOI: https://doi.org/10.1007/978–3–662–10018–9_12.

16. Creutz, M. Microcanonical cluster Monte Carlo simulation / M. Creutz // Physical Review Letters. — 1992. — Vol. 69 (7). — P. 1002–1005. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.69.1002.

17. Beichl, I. The metropolis algorithm / I. Beichl, F. Sullivan // Computing in Science & Engineering. — 2000. — Vol. 2 (1). — P. 65–69. DOI: https://doi.org/10.1109/5992.814660.

18. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. — Москва : Наука, 1971. — 305 с.

19. Поршнев, С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB / С. В. Поршнев. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 726 с.

20. Pustovoit, V. N. Features of martensitic transformation in steel during quenching in a constant magnetic field / V. N. Pustovoit, Y. V. Dolgachev, L. P. Aref'eva // Materials Science Forum. — 2019. — Vol. 946. — P. 304–308. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.304.

21. Стильбанс, Л. С. Ближний и дальний порядок в ферромагнитных телах / Л. С. Стильбанс // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1939. — Т. 9. — С. 432.

22. Вонсовский, С. В. О ферромагнитной и парамагнитной точках Кюри ферромагнетиков / С. В. Вонсовский // Доклады Академии наук СССР. — 1940. — Т. 27, № 5. — С. 550–553.

23. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм как проблема упорядочения / С. В. Вонсовский // Известия Академии наук СССР. — Серия физическая. — 1947. — Т. 11, № 5. — С. 485–486.

24. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. — Москва ; Ленинград : ОГИЗ, 1948. — 816 с.

Поступила в редакцию 26.12.2019
Запланирована в номер 19.02.2020

Об авторах

Долгачев Юрий Вячиславович, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: B-2328-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8558-1136, yuridol@mail.ru.

Пустовойт Виктор Николаевич, профессор кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: A-6050-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6999-3520, fipm-dstu@mail.ru.

Филоненко Ирина Олеговна, студентка кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0572-5030, 89896231497i@gmail.ru.

Иванков Иван Вениаминович, студент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6466-412X, vanya.ivankov.99@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов

Ю. В. Долгачев — формирование основной концепции, целей и задач исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формулирование выводов; В. Н. Пустовойт — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов; И. О. Филоненко — реализация алгоритма модели в среде программирования, подготовка расчетов; И. В. Иванков — доработка и корректировка модели в среде программирования, участие в подготовке расчетов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 534:62–13 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-61-67

Определение линейных характеристик опорных узлов ротора под нагрузкой



С. И. Лазарев, О. В. Ломакина, В. И. Галаев
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (г. Тамбов, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена аналитическим исследованиям динамической системы «ротор — опора с зазором», находящейся под технологической нагрузкой. Цель исследования — получить выражения для определения эквивалентных жесткостных характеристик системы.
Материалы и методы. Рассмотрен ротор, вращающийся в упругих опорах с зазорами. Предложена динамическая модель, позволяющая рассматривать задачу определения линейных эквивалентных жесткостных характеристик опорных узлов. Для решения задачи составлена система дифференциальных уравнений и выполнен их детальный анализ.
Результаты исследования. Из полученных уравнений динамики рассматриваемой системы можно рассчитать статический угол отклонения цапф ротора, обусловленный действием нагрузки. Предложенные выражения для определения эквивалентных жесткостных характеристик свидетельствуют о том, что можно исследовать динамику ротора как на линейных упругих опорах с указанными выше параметрами.
Проанализирована полученная система уравнений и перечислены все частные случаи применения формул первого приближения для эквивалентных жесткостей опорных узлов ротора.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты позволяют исследовать многие динамические процессы на основе линейных дифференциальных уравнений, учитывая нелинейные свойства системы. Для тех строгальных машин, которые используются при работе с кожаными материалами, определение колебаний ротора в горизонтальной плоскости обеспечивает качество и точность операций.

Ключевые слова: машиностроение, ротор, динамическое роторное оборудование, равновесие ротора, опорные узлы ротора, линейные эквивалентные жесткостные параметры узлов ротора, режимы работы ротора.

Для цитирования: Лазарев, С. И. Определение линейных характеристик опорных узлов ротора под нагрузкой / С. И. Лазарев, О. В. Ломакина, В. И. Галаев // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 61−67. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-61-67

Финансирование: работа выполнена по теме №10.4798.2017/БЧ в рамках госзадания Минобрнауки России в части НИР.



Determination of linear characteristics of rotor mounting groups under load

S. I. Lazarev, O. V. Lomakina, V. I. Galaev
Tambov State Technical University (Tambov, Russian Federation)

Introduction. The paper considers analytical studies on the “rotor – gapped-type support” dynamic system under process loading. The research objective is to obtain expressions for determining the equivalent stiffness characteristics of the system.
Materials and Methods. A rotor rotating in the elastic gapped-type supports is considered. A dynamic model that enables to consider the problem of determining the linear equivalent stiffness characteristics of mounting groups is proposed. To solve the problem, a system of differential equations is compiled, and a detailed analysis is performed.
Results. From the obtained dynamic equations of the system in question, we can calculate the static angular deviation of the rotor pins due to the action of the load. The proposed expressions for determining equivalent stiffness characteristics testify that it is possible to study the rotor dynamics as on the linear elastic supports with the above parameters. The obtained system of equations is analyzed, and all special cases of applying the first approximation formulas for equivalent stiffness of the rotor mounting groups are listed.

Discussion and Conclusions. The results obtained make it possible to study many dynamic processes on the basis of linear differential equations considering the nonlinear properties of the system. For shavers used in the production of leather materials, the determination of rotor vibrations in the horizontal plane provides the quality and accuracy of operations.

Keywords: mechanical engineering, rotor, dynamic rotor equipment, rotor balance, rotor mounting groups, linear equivalent stiffness parameters of rotor units, rotor operating modes.

For citation: S.I. Lazarev, O.V. Lomakina, V.I. Galaev. Determination of linear characteristics of rotor mounting groups under load. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 61−67. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-61-67

Funding information: the research is done on theme no. 10.4798.2017/БЧ within the frame of the government task of RF Ministry of Education and Science in R&D

Введение. Технический прогресс предъявляет новые, более высокие требования к качеству продукции машиностроения. Главным образом речь идет о высокой надежности, долговечности машин, их продуктивности и безопасности. Все эти параметры должны быть учтены и рассчитаны на этапе разработки.

С точки зрения производственных процессов особое значение имеет динамическое роторное оборудование, обеспечивающее непрерывность технологического процесса [1–3]. В [4] представлены схемы конструкций и принцип работы различных роторных машин, выполнен патентный поиск по каждому их виду. В [5] рассмотрен характер зависимости эквивалентной жесткости от частоты колебаний для определенной модели, приведена зависимость критических частот от эквивалентной жесткости опор. В [6] авторы подробно рассматривают вопросы контроля вибрации, виброналадочных работ и предотвращения увеличения вибрации роторных машин, равновесия роторов. Кроме того, здесь перечислены источники вибрации и приводятся базовые сведения из теории колебаний. В работах [7–9] обсуждаются проблемы динамики жесткого неуравновешенного ротора с четырьмя степенями свободы. Исследование [10] базируется на допущении, что реакции подшипника — это квазилинейные силы с кубической нелинейностью. С учетом этого рассматривается воздействие радиального зазора на движение в пространстве динамически неуравновешенного ротора под влиянием сил внутреннего трения. В [11] показаны взаимосвязи поперечных и крутильных колебаний, возникающие при вращении ротора центрифуги. Разработана линеаризованная математическая модель ротора в упругих опорах, учитывающая влияние поперечных и крутильных колебаний.

Проведенный обзор литературы позволяет утверждать, что исследование колебательного процесса и соответствующих параметров линейных механических систем представляет интерес. В данной работе рассмотрен ротор, в частности его опорные узлы с зазорами. Цель исследования — определить значения под нагрузкой линейных эквивалентных жесткостных параметров названных узлов.

Материалы и методы. В качестве ротора использована динамическая модель, предусматривающая вращение в упругих опорах с зазорами (рис. 1).

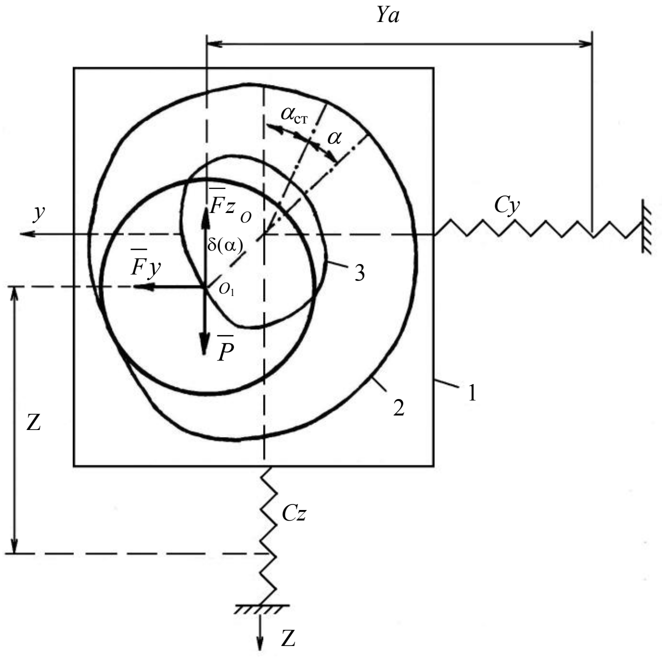


Рис. 1. Динамическая модель ротора, который вращается в упругих опорах с зазорами

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 — опора ротора; 2 — граница контакта опоры с цапфой ротора; 3 — кривая относительного движения центра цапфы ротора; m — масса ротора; $\beta(\alpha)$ — радиальный зазор в роторных опорах (представлен функцией угла смещения его цапф от вертикальных направляющих); C_y, C_z — общие жесткости кожухов опорных узлов соответственно в горизонтальных и вертикальных направляющих; $y_{ст}$ $z_{ст}$ — статический сдвиг центра масс ротора в горизонтальном и вертикальном направлении, вызванный деформациями в опорных узлах; α — динамический угол наклона цапф ротора; $\alpha_{ст}$ — угол наклона от положения равновесия, вызванный технологической нагрузкой на ротор; y_α, z_α — полные динамические смещения центра масс ротора в указанных выше направлениях; $f = Fz / Fy$ — взаимосвязь вертикальной и горизонтальной компонент технологической нагрузки.

Для определения потенциальной ($П$) и кинетической (T) энергий исследуемой системы воспользуемся следующими равенствами:

$$П = \frac{1}{2} C_y \left[y_a + y_{cm} - \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta(\alpha_{cm}) \sin \alpha_{cm} \right]^2 +$$
$$+ \frac{1}{2} C_z \left[z_a + z_{cm} - \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta(\alpha_{cm}) \cos \alpha_{cm} \right]^2 -$$
$$-mg \left[z_a + z_{cm} + \delta(\alpha_{cm}) \cos \alpha_{cm} \right];$$
$$T = \frac{1}{2} m \left(\dot{y}_a^2 + \dot{z}_a^2 \right) + \frac{1}{2} A \omega^2 .$$

Здесь A — полярный момент инерции, ω — угловая скорость вращающегося ротора.

Следует учитывать, что действующие силы не являются потенциальными. При этом обобщенные силы, которым соответствуют введенные ранее координаты y_α, z_α, α, примут вид:

$$Q_{y_a} = F_y, \; Q_{z_a} = -F_z,$$
$$Q_\alpha = F_y \begin{Bmatrix} \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) \right] + \\ + f \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) - \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) \right] \end{Bmatrix}.$$

Здесь $\delta'(\alpha + \alpha_{cm})$ — производная радиального зазора по углу α; $f = \frac{F_z}{F_y}$ — взаимосвязь вертикальной и горизонтальной компонент технологической нагрузки.

При данных условиях уравнения, выражающие динамику системы, можно записать:

$$\begin{cases} m\ddot{y}_a + C_y \cdot y_a - C_y \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) + C_y \delta(\alpha_{cm}) \sin \alpha_{cm} = 0, \\ m\ddot{z}_a + C_z \cdot z_a - C_z \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) + C_z \delta(\alpha_{cm}) \cos \alpha_{cm} = 0, \\ mg \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) - \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) \right] - \\ -C_y \left[y_a - \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta(\alpha_{cm}) \sin \alpha_{cm} \right] \times \\ \times \left[\delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) \right] + \\ +C_z \left[z_a - \delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta(\alpha_{cm}) \cos \alpha_{cm} \right] \times \\ \times \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) - \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) \right] = \\ = F_y \begin{Bmatrix} \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) + \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) \right] + \\ + f \left[\delta(\alpha + \alpha_{cm}) \sin(\alpha + \alpha_{cm}) - \delta'(\alpha + \alpha_{cm}) \cos(\alpha + \alpha_{cm}) \right] \end{Bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрев более детально третье уравнение системы (1), определим угол наклона α_{cm}, считая $\alpha = 0$. После преобразований в уравнениях (1) получим более простую систему:

$$\begin{matrix} m\ddot{y}_a + C_{экв}^{y} \cdot y_a + C_{экв}^{yz} \cdot z_a = 0, \\ m\ddot{z}_a + C_{экв}^{z} \cdot z_a + C_{экв}^{zy} \cdot y_a = 0. \end{matrix} \quad (2)$$

Анализ уравнений (2) позволяет в первой аппроксимации значений рассматривать упругую опору с зазором как опору с линейными упругими характеристиками (и в горизонтальных, и в вертикальных направляющих):

$$F_y = C_{экв}^{y} \cdot y_a + C_{экв}^{yz} \cdot z_a, \; F_z = C_{экв}^{z} \cdot z_a + C_{экв}^{zy} \cdot y_a .$$

Здесь

$$C^{y}_{экв}=\frac{C_y\left[mg\cdot r+\cos^3\alpha_{cm}\left(\theta+f\cdot z\cdot z^2\cdot C_z\right)\right]}{\Delta},\;C^{z}_{экв}=\frac{C_z\left[mg\cdot r+\cos^3\alpha_{cm}\left(\theta+f\cdot z\cdot\theta^2\cdot C_y\right)\right]}{\Delta},$$

$$C^{yz}_{экв}=C^{zy}_{экв}=\frac{C_yC_z\cos^3\alpha_{cm}\cdot\theta\cdot z\left(\theta+f\cdot z\right)}{\Delta},$$

$$r=\delta^2\left(\alpha_{cm}\right)+2\delta'\left(\alpha_{cm}\right)^2-\delta\left(\alpha_{cm}\right)\cdot\delta''\left(\alpha_{cm}\right),$$

$$\theta=\delta\left(\alpha_{cm}\right)+\delta'\left(\alpha_{cm}\right)\cdot tg\alpha_{cm},\; z=\delta\left(\alpha_{cm}\right)\cdot tg\alpha_{cm}-\delta'\left(\alpha_{cm}\right),$$

$$\Delta=mg\cdot r+\cos^3\alpha_{cm}\left(\theta+f\cdot z\right)\cdot\left(C_z\cdot z^2+C_y\cdot\theta^2\right). \quad (3)$$

Результаты исследования. В системе (3) величины $C^{y}_{экв}$, $C^{z}_{экв}$, $C^{yz}_{экв}$ выражают эквивалентные характеристики жесткости опоры с зазором.

Чтобы получить зависимости эквивалентных характеристик жесткости нелинейной механической системы, воспользуемся разложением тригонометрических функций в системе (1), учитывая слагаемые более высокого порядка. Для определения необходимых величин укажем:

$$y_a=A_y\cdot\sin\omega_1 t,\; z_a=B_z\cdot\cos\omega_1 t,$$

где B_z, A_y — амплитуда общего колебания ротора в вертикальных и горизонтальных направляющих соответственно, ω_1 — частота колебаний.

Таким образом,

$$C^{y}_{экв}=\frac{\omega_1}{\pi A_y}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega_1}}\Phi_y\left(y_a,z_a\right)\sin\omega_1 tdt,$$
$$C^{z}_{экв}=\frac{\omega_1}{\pi B_z}\int_0^{\frac{2\pi}{\omega_1}}\Phi_z\left(y_a,z_a\right)\cos\omega_1 tdt. \quad (4)$$

Здесь $\Phi_y\left(y_a,z_a\right)$, $\Phi_z\left(y_a,z_a\right)$ — функции координат y_a, z_a. Эти величины можно определить, обратившись к системе дифференциальных уравнений (1).

Решая систему уравнений (4) методами интегрирования, представим величины в виде:

$$C^{y}_{экв}=\frac{C_y\left(mgr+C_z\cos\alpha_{cm}\cdot b\cdot z^2\right)}{\Delta}+\frac{C_y^2\cos\alpha_{cm}\cdot\psi\cdot\theta\cdot b^3\left(C_y^2\cdot\theta^2\cdot A_y^2+C_z^2\cdot z^2\cdot B_z^2\right)}{8\Delta^3},$$
$$C^{z}_{экв}=\frac{C_z\left(mgr+C_y\cos\alpha_{cm}\cdot b\cdot\theta^2\right)}{\Delta}+\frac{C_z^2\cos\alpha_{cm}\cdot\psi\cdot z\cdot b^3\left(C_y^2\cdot\theta^2\cdot A_y^2+C_z^2\cdot z^2\cdot B_z^2\right)}{8\Delta^3}. \quad (5)$$

Здесь

$$b=\cos^2\alpha_{cm}\left(\theta+f\cdot z\right),$$

$$\psi=\delta\left(\alpha_{cm}\right)+3\delta'\left(\alpha_{cm}\right)tg\alpha_{cm}-3\delta''\left(\alpha_{cm}\right)-\delta'''\left(\alpha_{cm}\right)tg\alpha_{cm},$$

$$\xi=\delta\left(\alpha_{cm}\right)tg\alpha_{cm}-3\delta'\left(\alpha_{cm}\right)-3\delta''\left(\alpha_{cm}\right)tg\alpha_{cm}+\delta'''\left(\alpha_{cm}\right).$$

Анализируя (5), можно говорить о взаимозависимости не только между жесткостями корпусов в опорах ротора C_y, C_z, но и амплитуд A_y, B_z его общих колебаний.

Необходимо подчеркнуть, что жесткость $C^{yz}_{экв}$ выражается как взаимосвязь движений ротора в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В случае $C^{yz}_{экв}=0$ в системе (2) уравнения не будут связаны, что позволяет учесть все возможные варианты. Они перечислены ниже.

— При отсутствии изменений радиального зазора со временем и $\alpha_{cm}=0$ имеем $C^{z}_{экв}=C_z$. Такой вариант характерен для холостого режима работы ротора. При этом радиальное смещение ротора по отношению к опоре в вертикальных направляющих является совсем небольшой величиной, хотя и более высокого порядка, чем смещение в горизонтальных направляющих.

— Если принять $z=0$, то $C^{z}_{экв}=C_z$. Данная ситуация свойственна радиальному перемещению ротора по отношению к опоре в окружении точки, через которую проходит горизонтальная касательная к траектории относительного движения центра цапфы.

— При нулевом значении величины радиального зазора в опорах имеем $C^{y}_{экв}=C_y$ и $C^{z}_{экв}=C_z$.

— Если отсутствуют изменения радиального зазора и $\alpha_{cm} = 90°$, то $C^y_{экв} = C_y$. Это возможно, если ротор работает при технологической нагрузке с подобранным зазором, т. е. в горизонтальных направляющих радиальное смещение принимает малые значения по сравнению с вертикальным направлением.

— При $\theta = 0$ $C^y_{экв} = C_y$. В данном случае радиальные смещения ротора имеют место в окрестности точки, через которую проходит вертикальная касательная к линии относительного движения центра цапфы.

— Возможно выполнение равенства $\theta + f \cdot z = 0$. Это справедливо в случае радиального смещения ротора по отношению к опоре в окружении такой точки, через которую проведена нормаль, совпадающая с линией действия результирующей сил F_r и F_b. В этом случае $C^y_{экв} = C_y$ и $C^z_{экв} = C_z$.

Рассмотрим характеристики ротора на упругих опорах, жесткости которых равны $C^y_{экв}$, $C^z_{экв}$. Обозначим ε — эксцентриситет ротора, ω — его угловая скорость. Уравнения колебаний представим в виде системы:

$$\begin{cases} m\ddot{y}_a + C^y_{экв} \cdot y_a = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 \sin \omega t \\ m\ddot{z}_a + C^z_{экв} \cdot z_a = m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 \cos \omega t \end{cases}. \quad (6)$$

Решая (6), запишем выражения для амплитуд колебаний:

$$A_y = \frac{m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2}{C^y_{экв} - m \cdot \omega^2},\ B_z = \frac{m \cdot \varepsilon \cdot \omega^2}{C^z_{экв} - m \cdot \omega^2}. \quad (7)$$

Заметим, что слагаемые $C^y_{экв}$, $C^z_{экв}$ в знаменателях зависят от амплитуд A_y, B_z. Представим графически рассматриваемую систему (рис. 2).

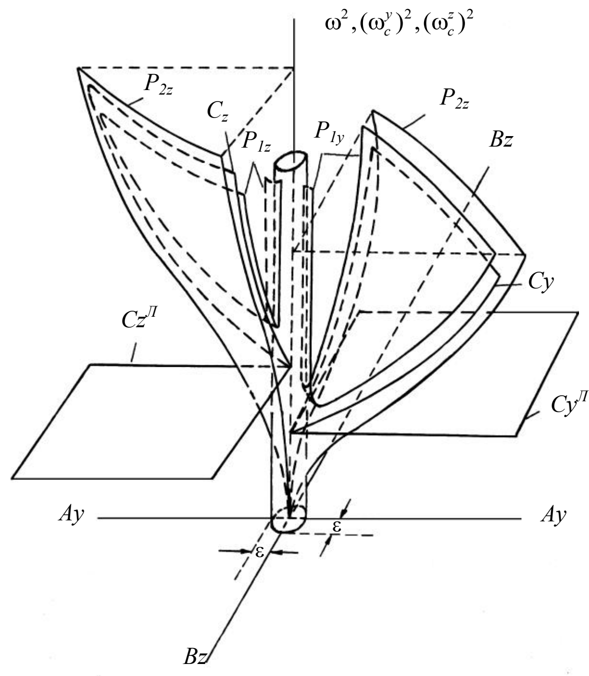


Рис. 2. Графическое представление динамических характеристик абсолютных колебаний ротора в опорах с зазорами

Поверхности P_{1y}, P_{2y}, P_{1z}, P_{2z} (резонансные) и C_y, C_z (скелетные) построены в предположении, что амплитуды A_y и B_z изменяются независимо на основании (7) и равенств $C^y_{экв} = m\left(\omega^y_c\right)^2$, $C^z_{экв} = m\left(\omega^z_c\right)^2$.

Амплитуды вынужденных колебаний A_y, B_z соответствуют частоте возмущающих сил ω_0. Принимая во внимание этот факт, для получения выражений указанных амплитуд сначала построим плоскость $\omega^2 = \omega_0^2$.

На линиях пересечения построенной плоскости с поверхностями P_{1y}, P_{2y} и P_{1z}, P_{2z} будут точки с идентичными координатами. Эти точки — искомые амплитуды колебаний ротора.

Плоскости $C^Л_y$, $C^Л_z$ — скелетные поверхности линейной системы. В этом случае в выражениях для эквивалентных жесткостей берутся только первые слагаемые. Они указывают на то, что частоты свободных колебаний линейной системы не зависят от амплитуд.

Резонансные поверхности представляют колебания ротора в горизонтальных направляющих, а скелетные — в вертикальных. Они построены в различных координатных октантах. По форме скелетные поверхности являются эллиптическими параболоидами. На рис. 2 ω_c^y, ω_c^z представляют собой частоты свободных колебаний системы.

Обсуждение и заключения. Одной частоте могут подходить несколько точек. Это означает, что в исследуемой системе возможно несколько режимов колебаний, в том числе неустойчивых. Для перехода системы с одного устойчивого режима движения на другой необходимы некоторые внешние воздействия, что характерно уже для нелинейных систем.

В качестве примера применения полученных зависимостей можно привести задачу о вынужденных колебаниях ротора вследствие его статической неуравновешенности.

Представленные в работе зависимости (4) указывают на то, что эквивалентные угловые жесткости взаимозависимы не только через жесткости C_y, C_z корпусов, но и через амплитуды A_y, B_z общих колебаний ротора.

В результате исследования линейных характеристик опорных узлов нагруженного ротора получены следующие результаты.

1. Предложена динамическая модель ротора, вращающегося в упругих опорах с зазорами. Данная модель позволяет исследовать задачи определения линейных эквивалентных жесткостных характеристик опорных узлов.

2. Проанализирована система уравнений и перечислены возможности применения формул. В частности, с их помощью можно определить колебания ротора в горизонтальной плоскости на строгальных машинах, используемых для получения заготовок кожи.

Библиографический список

1. Banaszek, S. The modeling of defects in the rotor-trains of turbomachinery-simulation-based diagnostics / S. Banaszek // Проблемы машиностроения. — 2013. — Т. 16, № 3. — С. 73–78.

2. Галаев, В. И. Виброактивность взаимодействия системы неуравновешенных валов, вращающихся в упруго-массовых опорах / В. И. Галаев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2004. — Т. 10, № 3. — С. 747–754.

3. Ломакина, О. В. Dynamic linearization of stiffness characteristics of elastic bearings with radial clearance of loaded rotor / О. В. Ломакина, В. И. Галаев // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. — 2011. — № 2 (33). — С. 387–393.

4. Гринёв, Д. В. Конструктивные схемы и принципы работы роторно-лопастных машин / Д. В. Гринёв // Вестник Псковского государственного университета. — 2014. — № 5. — С. 142–150.

5. Биялт, М. А. Расчетное исследование вибрационных характеристик динамической системы «Ротор — подшипники — опоры» / М. А. Биялт, А. А. Плотникова, Е. В. Урьев // Молодой ученый. — 2012. — № 11. — С. 23–26.

6. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин / А. С. Гольдин. — Москва : Машиностроение, 1999. — 344 с.

7. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. — Москва : Машиностроение, 1985. — 440 с.

8. Кельзон, А. С. Динамика роторов в упругих опорах / А. С. Кельзон, Ю. П. Циманский, В. И. Яковлев. — Москва : Наука, 1982. — 280 с.

9. Кельзон, А. С. Динамика статически неуравновешенного ротора в подшипниковых опорах / А. С. Кельзон, А. С. Меллер // Доклады Академии наук СССР. — 1991. — Т. 318, № 1. — С. 69–72.

10. Пасынкова, И. А. Установившиеся движения неуравновешенного ротора в подшипниках с радиальным зазором / И. А. Пасынкова // Вестник Санкт-Петербургского университета. — 2005. — Вып. 3. — С. 87–95.

11. Вульфсон, И. И. Нелинейные задачи динамики машин / И. И. Вульфсон, М. З. Коловский. — Ленинград : Машиностроение, 1968. — 284 с.

Сдана в редакцию 16.01.2020
Запланирована в номер 27.02.2020

Об авторах

Лазарев Сергей Иванович, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, 106), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0746-5161, sergey.lazarev.1962@mail.ru

Ломакина Ольга Владимировна, доцент кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, 106), кандидат педагогических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6908-6055, lomakinaolga@mail.ru

Галаев Валентин Иванович, доцент кафедры «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, РФ, г. Тамбов, ул. Советская, 106), кандидат технических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6793-6693, geometry@mail.nnn.tstu.ru

Заявленный вклад соавторов

С. И. Лазарев — формирование основной концепции; цели, задачи и методы исследования. О. В. Ломакина — литературный обзор, подготовка текста, получение результатов и формирование выводов. В. И. Галаев — анализ результатов исследований, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.20 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-68-78

Статистический анализ размерных характеристик пыли, образующейся при механической обработке металлов



Н. Н. Азимова, Е. Н. Ладоша, С. Н. Холодова, Д. С. Цымбалов, О. В. Яценко
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена математическому анализу фракционного состава пыли, образующейся при работе рельсорезного станка. Установлено, что исследованный полидисперсный материал хорошо описывается однопараметрическим экспоненциальным распределением. В то же время адекватным для достижения целей расчета циклонов представляется логнормальное распределение частиц по размерам, параметры которого определены методами математического программирования.
Целью работы являлась отработка математических методов корректного осреднения размерно-массовых параметров пыли при механической обработке твердых металлов.
Материалы и методы. Изучалась возможность аппроксимировать экспериментальные данные распределениями Розина — Раммлера (классическим, обобщенным трехпараметрическим $P(x, D, n, m)$ и упрощенным экспоненциальным $P(x)$, в котором $n = 1$). Сопоставлялись соответствующие результаты между собой и с данными аппроксимации логнормальной и двойной логнормальной функциями. Эти результаты свидетельствуют о близком качестве аппроксимации с использованием модельных распределений $P(x)$:

- пятипараметрического двойного логнормального;
- трехпараметрического типа Розина — Раммлера;
- двухпараметрического классического Розина — Раммлера;
- однопараметрического экспоненциального.

Результаты исследования. Первичный физический анализ отходов резания осуществлялся при помощи лабораторно-измерительного комплекса *Fritsch Analysette* 22 *Compact*, использующего метод *LALLS* — *low angle laser scattering*. Программное обеспечение комплекса реализует результаты измерений в первичной графической и цифровой формах. Выявлено, что для детального анализа распределения пылевых частиц по размерам на основе экспериментальных данных, лучше прочих подходит простейшее экспоненциальное распределение. На основе этого распределения можно воспроизвести все интегральные показатели, предоставляемые инструментальным измерительным комплексом наряду с графическими данными.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты могут быть использованы для рационализации станка местного отсоса, а математические модели и алгоритмы — для параметрического анализа любой пыли, улавливаемой циклонами.

Ключевые слова: резание металлов, пыль, распределение по размерам, статистика, математическое программирование.

Образец для цитирования: Статистический анализ размерных характеристик пыли, образующейся при механической обработке металлов / Н. Н. Азимова, Е. Н. Ладоша, С. Н. Холодова [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, №1. — С. 68−78. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-68-78

Финансирование: Работа выполнена по теме «Разработка основ технологии проектирования комплексных систем и средств защиты операторов от воздействия опасных и вредных производственных факторов» № 5,6968,2017/БЧ в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.



Statistical analysis of sizing features of dust generated under the mechanical metal-working

N. N. Azimova, E. N. Ladosha, S. N. Kholodova, D. S. Tsymbalov, O. V. Yatsenko
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The paper considers the mathematical analysis of the fractional composition of dust generated during the operation of the rail-cutting machine. It is established that the studied polydisperse material is well described by the one-parameter exponential distribution. At the same time, the lognormal particle size distribution, whose parameters are determined by mathematical programming methods, seems adequate for the purposes of calculating cyclones. The work objective was to develop mathematical methods for correct averaging of the size and mass parameters of dust under the solid metal machining.
Materials and Methods. We studied the possibility of approximating experimental data by Rosin – Rammler distributions (classical, generalized three-parameter $P(x, D, n, m)$, and simplified exponential $P(x)$, in which $n = 1$). The corresponding results were compared to each other and to the data of approximation of the lognormal and double lognormal functions. These results indicate close approximation quality using the following model distributions $P(x)$:

- five-parameter double lognormal;
- three-parameter type of Rosin-Rammler;
- two-parameter classical Rosin - Rammler;
- one-parameter exponential.

Results. The primary physical analysis of cutting waste was carried out by the laboratory measuring complex *Fritsch Analysette* 22 *Compact* which uses the *LALLS – low angle laser scattering* method. The built-in software provides output of measurement results in primary graphic and digital forms. It was found that the simplest exponential distribution is best suited for a detailed analysis of the dust particle-size distribution based on the experimental data. This distribution enables reproduction of all the integral indicators provided by the instrumental measuring complex along with the graphical data.
Discussion and Conclusions. The results obtained can be used to rationalize the local suction machine, and the mathematical models and algorithms can be used for the parametric analysis of any dust captured by cyclones.

Keywords*:* metal cutting, dust, size distribution, statistics, mathematical programming

For citation: N.N. Azimova, E.N. Ladosha, S.N. Kholodova, et al. Statistical analysis of sizing features of dust generated under the mechanical metal-working. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 68−78. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-68-78

Funding information: The research is done on theme “Development of the basics for designing integrated systems and means of operator protection from exposure to hazardous and harmful production factors” no. 5,6968,2017/БЧ within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.

Введение. Пыль, образующаяся при механической обработке (резании, сверлении, шлифовании, полировке и пр.) твердых металлов и сплавов способна нанести прямой или косвенный ущерб здоровью человека, привести к загрязнению природной среды. Для исключения этих негативных последствий широко используются циклоны — устройства общей и местной очистки воздуха, использующие аэродинамический захват пыли силами инерции с последующим отсевом ее из воздушной струи в накопитель [1]. Эффективность циклонов обеспечивается расчетом, цель которого — гарантированно уловить взвешенные в воздушной струе твердые частицы заданной категории при минимальных экономических издержках. Поскольку улавливание частиц обеспечивается за счет конкуренции инерционных и аэродинамических сил, соответствующие физические критерии составляют основу расчета циклонов [2]. Важнейшими элементами этих критериев служат размерные и массовые характеристики пылевых частиц. Вследствие естественной неоднородности производственной пыли эти характеристики имеют статистическую природу, что выдвигает жесткие требования к корректности их осреднения при расчетах систем пылеочистки (циклонов). Таким образом, достоверные научные сведения о размерных и массовых параметрах пыли при различных видах механической металлообработки являются актуальными, поскольку их практическое применение позволяет рационально организовать пылеулавливание посредством циклонов.

Цель настоящего исследования — отработка математических методов корректного осреднения размерно-массовых параметров пыли при механической обработке твердых металлов. Полученные результаты использовались для рационализации станка местного отсоса, а отработанные авторами математические модели

и алгоритмы без существенных ограничений применимы для параметрического анализа любой пыли, подлежащей улавливанию циклонами.

Теоретические основы исследования. Пылевая частица находятся под действием силы тяжести и силы инерционной природы, которая пропорциональна массе частицы, равной $\rho \cdot x^3$, где ρ — плотность образующего материала в [кг/м^3]; x — характерный размер частицы в [мкм]. Следовательно, знание инерционных свойств пыли сводится к знанию ее плотности и характерного размера. Величина аэродинамической силы, действующей на такую частицу со стороны потока, пропорциональна квадрату ее характерного размера x^2 и не зависит от плотности. Фигурирующее в критерии эффективности циклона отношение этих сил соответственно пропорционально комплексу $\rho \cdot x$. Однако здесь следует учесть два важных обстоятельства: во-первых, пылевые частицы существенно отличаются по размерам и, во-вторых, форма каждой пылинки уникальна и далека от используемых эталонов (сфера, куб и др.). Эти особенности выдвигают весьма жесткие требования к процедуре двойного осреднения величины характерного размера пылевой частицы по составляющим размерам и форме. Очевидно, что методика, осредняющая характерный размер пылинок, носит целевой характер: в нашем случае она соответствует расчету эффективности циклонов.

Впервые параметрическое осреднение полидисперсных сред систематически исследовал Заутер [3, 4]. Основные результаты его работ сводятся к следующему:

1. Для различных целей важны специфически осредненные средние размеры частиц из неоднородной совокупности. Поскольку средний размер представляет собой величину, выражаемую долями метра, очевидным является следующий способ размерного осреднения ансамбля частиц с функцией распределения $F(x)$ и соответственно плотностью вероятности $P(x) = dF(x)/dx$:

$$<x>_{ij} = [\, \int P(x)\, x^i\, dx \,/ \int P(x)\, x^j\, dx \,]^{1/(i-j)} \; . \qquad (1)$$

2. Формула (1) подразумевает, что все пылевые частицы характеризуются единственным размером, т. е. имеют форму шара. Поэтому величину $<x>_{ij}$ называют заутеровским диаметром и обозначают D_{ij} (чаще всего под заутеровским диаметром понимается величина D_{32}).

3. Если форма частиц существенно неправильна и характеризуется двумя или темя параметрами, в рассмотрение вводят также коэффициент формы. Физический смысл и практическое применение различных заутеровских диаметров приведены в табл. 1, а важные сведения о коэффициенте формы — в работе [5].

Многочисленные исследования дисперсности различных сред и материалов позволяют утверждать [6], что полученные в результате однократного дробления твердые частицы распределены по размерам согласно двухпараметрическому закону Розина — Раммлера:

$$F(x, D, n) = 1 - \mathrm{e}^{-(x/D)^n}, \qquad P(x, D, n) = 1/D \cdot (x/D)^{n-1} \cdot \mathrm{e}^{-(x/D)^n}, \qquad (2)$$

где величина $<x> = D \cdot \Gamma(1 + 1/n)$ характеризует средний размер частиц, а n — степень размерной неоднородности ансамбля (чем меньше n, тем выше полидисперсность порошка).

При многократном измельчении порошки состоят из частиц, размеры которых удовлетворяют двухпараметрическому логнормальному распределению Гаусса — Колмогорова [6]:

$$P(x, D, \sigma) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi} \cdot lg\sigma \cdot x} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\lg x - \lg D}{\lg\sigma}\right)^2} \; . \qquad (3)$$

В распределении (3) параметр $\lg D$ отвечает условному среднему размеру частицы, а параметр $\lg \sigma$ — разбросу реальных размеров частиц вокруг условного среднего.

Принципиальным достоинством модели Гаусса — Колмогорова является удобство пересчета величин D_{ij} по линейным соотношениям Хэтча — Шоута [7], связывающим их с величинами D и σ. Форма этих соотношений такова, что при известных двух любых величинах D_{nm} и D_{kl} можно вычислить все прочие.

Важно отметить, что анализируемый авторами порошок (отходы резания рельса) не обязательно описывается приведенными здесь классическими моделями. Во-первых, технологический процесс резания содержит элементы как уникальности (каждый контакт абразивного круга с материалом рельса неповторим), так и множественности (подобные взаимодействия повторяются чрезвычайно многократно). Во-вторых, форма металлических опилок далека от сферической. Наконец, наряду с металлическими опилками, отходы резания содержат частицы выкрашивающегося абразива. Содержание последних в силу особенностей процесса и требований к инструменту может существенно различаться. Таким образом, исследование распределения отходящей пыли по размерам частиц представляется практически важной и научно значимой задачей.

Экспериментальные данные. Первичный физический анализ отходов резания осуществлялся при помощи лабораторно-измерительного комплекса *Fritsch Analysette 22 Compact*, использующего метод *LALLS — low angle laser scattering* [8]. Встроенное программное обеспечение реализует результаты измерений в

первичной графической, и цифровой формах. Недостатками программной части комплекса являются: отсутствие детальных сведений об алгоритмах преобразования измеряемых величин и характере выводимых данных, а также количественные погрешности данных, отображаемых в форме графиков. В частности, может показаться, что шкала дифференциальной функции распределения (плотности вероятности) приводится на распечатках с погрешностью в несколько раз. Более глубокое рассмотрение позволяет заключить, что фактически на этом графике приведена зависимость величины $P(x_k)\, dx_k$ от x_k, причем разбиение частиц по размерам на группы шириной dx_k не является равномерным. Кроме того, вычисляемые программой интегральные характеристики распределения частиц по размеру D_{ij} не документированы, что требует их проверки на соответствие как исходным графическим данным, так и классическим моделям Розина — Раммлера и Гаусса — Колмогорова.

Отмеченные обстоятельства при оценке результатов анализа, выводимых встроенной программой, обусловливают проведение дополнительных мероприятий: нормирование исходной кривой дифференциальной функции распределения, а также проверку согласия интегральных показателей D_{ij} как этой функции распределения, так и базовым модельным распределениям. Реализация этих задач требует высококачественной оцифровки графических результатов фракционного состава, предоставляемых прибором *Fritsch Analysette* 22 *Compact*, а для этого необходимы специализированное программное обеспечение [9, 10] и разработка надлежащих алгоритмов верификации данных.

Техника оцифровки и верификации экспериментальных данных. Для оцифровки первичных графических данных дисперсионного анализа, полученных при помощи прибора *Fritsch Analysette* 22 *Compact*, использовалась специализированная программа *Grafula* [11]. Этот свободно распространяемый информационный продукт позволяет перевести графически представленные зависимости в табличный вид. Процедура оцифровки сводится к считыванию графика, размещению на нем осей декартовых координат, заданию масштабов и нанесению на линию, отображающую зависимость, достаточного числа маркеров.

Результат автоматической оцифровки относится к положению введенных пользователем точек и формируется в *Excel*-совместимую таблицу. Погрешность получаемых в результате цифровых данных имеет несколько составляющих:

- погрешность формирования графика, обусловленная особенностями комплекса *Fritsch Analysette* 22 *Compact*;
- дефекты печати принтером или отображения в качестве электронной фотографии (скриншота);
- неточности оцифровки графика программой *Grafula*;
- невозможность достаточно точно маркировать кривую на графике вследствие ограничений как в разрешении системы, так и в психомоторных возможностях человека.

Последняя из перечисленных погрешность, по-видимому, является самой существенной. Отмеченные обстоятельства требуют дополнительных проверок результатов оцифровки с целью исключить критичные ошибки и верно оценить погрешность результата.

Для верификации результатов оцифровки данная работа выполнялась в несколько этапов. Вначале применительно к данным в нормальном по размеру частиц представлении применительно к представленным в логарифмическом масштабе, затем результаты первичного анализа сопоставлялись графически. При этом оба оцифрованных ряда подвергались перенормировке с целью исключить систематическую погрешность и обеспечить выполнение важного для функции распределения $F(x)$ условия: $F(\infty) = 1$. Впоследствии на основе каждого из результатов строились однотипные модельные распределения, эмпирические параметры которых определялись методами математического программирования [12] и сопоставлялись. Последним этапом проверки служило сравнение рассчитанных по построенным модельным распределениям осредненных показателей размерного состава пыли с интегральными характеристиками распределений, которые выдаются программным обеспечением прибора *Fritsch Analysette 22 Compact*.

Оказалось, что искажение функции распределения $F(x)$ в результате невозможности извлечь ее из инструментального прибора непосредственно в цифровом представлении составляет 15 % при оцифровке графика в линейном (по размеру частиц) масштабе и 8 % при оцифровке графика в логарифмическом масштабе. О согласовании полученных двумя способами данных позволяет судить рис. 1, из которого следует, что оба восстановленных распределения практически совпадают, начиная с диаметра 10 мкм. В то же время полтора десятка первых точек, доступных для считывания с графика, имеющего логарифмическую шкалу размеров, свидетельствуют о наличии значительной доли мелких, наиболее опасных для человека частиц размером менее 10 мкм. Данное обстоятельство является второстепенным, поскольку активные системы очистки воздуха захватывают преимущественно мелкие частицы.

Тот факт, что при $x \geq 10$ мкм выводимые прибором *Fritsch Analysette* 22 *Compact* в различных масштабах графические распределения совпадают, подтверждается следующей проверкой. Если аппроксимировать кривой Розина — Раммлера оба ряда экспериментальных данных и сопоставить полученные кривые, можно количественно оценить влияние погрешности оцифровки на конечный результат.

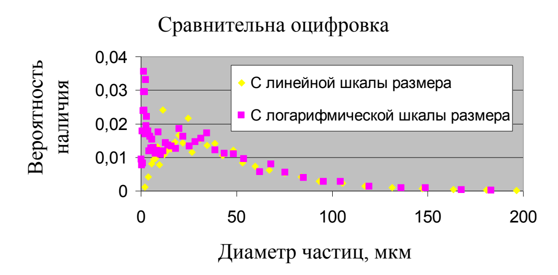


Рис. 1. Результаты оцифровки данных дисперсионного анализа металлоабразивной пыли

Для аппроксимации моделью (2) сравниваемых данных, представленных на рис. 1, численно решалась оптимизационная задача, относящаяся к математическому программированию [12]. Минимизировалась невязка между фактическим и теоретическим распределениями частиц по размерам. Если невязку определять по удобной для вычислений декартовой норме, требуется минимизировать функционал:

$$\Phi(x, D, n) = \sum_k [P(x_k, D, n) - P_k]^2 \rightarrow \min,$$

где k — номер узловой (табличной) точки; P_k — значение экспериментальной плотности вероятности; D и n — описанные выше параметры модельного распределения Розина — Раммлера.

Решая эту задачу средствами *Excel*, получаем следующий результат. Для данных, полученных с графика линейного по x, величины D и n равны соответственно 48,37 мкм и 1,588 мкм. При этом аппроксимирующая $P(x, D, n)$ кривая характеризуется средней невязкой с экспериментальными точками 0 00274 и коэффициентом корреляции 0 894. Аналогично решая задачу для 35-ти правых точек, восстановленных с логарифмического по размеру графика, получаем значения D = 48,61 мкм, n = 1,346, невязка — 0,00187, коэффициент корреляции — 0,934. Близость параметров D и n для обеих таблиц совместно с малой невязкой и высокой корреляцией свидетельствуют о примерной равноценности исследованных графических образов анализируемого результата. Об отличии представления данных в формульном виде, полученных из сравниваемых графических источников, позволяет судить корреляция функций $P(x, D, n)$ с вычисленными и приведенными выше значениями параметров. Ее величина равна 0,99.

Поскольку важны размерные характеристики пыли, осредненные на основании некоторого реалистичного распределения, вычислим набор показателей *Dij* согласно инициализированной выше модели Розина — Раммлера при значениях параметров D и n, полученных разными способами. Затем сравним результаты между собой и с интегральными показателями D_{ij}, которые регистрируются прибором *Fritsch Analysette* 22 *Compact*.

Цель сравнения анализируемых графических распределений с регистрируемыми прибором интегральными показателями D_{ij} — выяснить, какое именно распределение приведено на этих графиках. То обстоятельство, что на экране прибора *Fritsch Analysette* 22 *Compact* величина D_{43} совпадает со среднеарифметическим диаметром в пяти десятичных знаках, а величина D_{32} — со среднегеометрическим размером столь же точно, позволяет предположить, что по ординате графика регистрируется не параметр $P(x_k)$, а дифференциал взвешенной на x^3 функции распределения:

$$dF(x_k) = P(x_k)\, x_k^3\, dx_k. \tag{4}$$

Это обстоятельство является ключевым при интерпретации результатов размерного анализа пылевых частиц на основе распечатанных прибором гистограмм. Проверим предложенную гипотезу, рассчитав моменты D_{ij}. Результаты сравнения расчетов при принятии или отвержении гипотезы авторов с соответствующими числовыми данными, регистрируемыми прибором *Fritsch Analysette* 22 *Compact*, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление заутеровских диаметров пыли
на основе аппроксимаций оцифрованных графических данных

Диаметр, мкм	Гипотеза (4) не верна		Гипотеза (4) верна		Числовые данные прибора, мкм
	D = 48,4 мкм, n = 1,588	D = 48,6 мкм, n = 1,346	D = 48,4 мкм, n = 1,588	D = 48,6 мкм, n = 1,346	
D_{43}	90,2	107,1	43,4	44,4	43,5
D_{42}	83,2	97,9	30,4	27,5	20,9
D_{41}	75,2	87,1	15,6	12,5	8,18
D_{40}	65,5	73,6	7,61	6,11	4,23
D_{32}	76,7	89,5	21,3	17,0	10,0
D_{31}	68,6	78,5	9,38	6,62	3,55
D_{30}	58,9	64,9	4,26	3,15	1,95
D_{21}	61,4	68,8	4,13	2,57	1,25
D_{20}	51,6	55,2	1,90	1,35	0,66
D_{10}	43,4	44,4	0,88	0,71	0,59

Как видно из таблицы, гипотеза о сути данных, полученных с помощью сервисной программы *Fritsch Analysette* 22 *Compact*, верна. Это заключение является принципиальным при интерпретации результатов размерного анализа пыли.

Результаты статистического анализа графических данных и их интерпретация. Чтобы лучше описать мелкодисперсную часть пыли воспользуемся графическими данными (рис. 1) в логарифмическом масштабе размера и аппроксимируем их пятипараметрическим распределением, отвечающим взвешенной сумме двух логнормальных распределений:

$$P(x, D_1, D_2, \sigma_1, \sigma_2, \alpha) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi}\cdot x}\cdot\left[\frac{\alpha}{\sigma_1}+\frac{1-\alpha}{\sigma_2}\right]\left[\alpha\cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\lg x-\lg D_1}{\lg\sigma_1}\right)^2}+(1-\alpha)\cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\lg x-\lg D_2}{\lg\sigma_2}\right)^2}\right],$$

где D_1 и D_2 — положение пиков, σ_1, σ_2 — ширина пиков, α — доля частиц, приходящихся на первую моду.

Решение соответствующей оптимизационной задачи средствами *Excel* дает следующий результат: D_1 = 45,2 мкм, D_2 = 7,0 мкм, σ_1 = 1,97 мкм, σ_2 = 2,1 мкм, α = 0,858. Средняя невязка между аппроксимирующей функцией и исходными данными составляет 31 %, а коэффициент корреляции — 0,977. Это удовлетворительное соответствие, учитывая высокую погрешность экспериментальных значений (рис. 1). Отметим, что этот результат относится к взвешенной на x^3 истинной функции распределения пыли по размерам. Трактовать его можно следующим образом: основную массу пыли (около 85 %) составляют частицы размером более 10 мкм, поэтому для практической очистки воздуха это распределение можно заменить двухпараметрическим логнормальным (2) с параметрами: $D = D_1$ = 45,2 мкм и $\sigma_1 = \sigma_1$ = 1,97 мкм. Однако, такое упрощение не позволит качественно аппроксимировать D_{ij} с $j < 3$, в то время как учет мелкой фракции важен для некоторых приложений, например, для вычисления всех используемых диаметров D_{ij} и моментов функции распределения $P(x)$. Ниже приведены результаты сопоставления двойной логнормальной и логнормальной аппроксимаций $P(x)$. На рис 2 представлена аппроксимация экспериментальных данных двойным логнормальным распределением:

$$P(x) = 0{,}176\cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\lg x-1{,}65}{0{,}416}\right)^2} + 0{,}563\cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\lg x-0{,}898}{0{,}791}\right)^2}.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0,31, коэффициент корреляции с экспериментальными точками — 0,977.

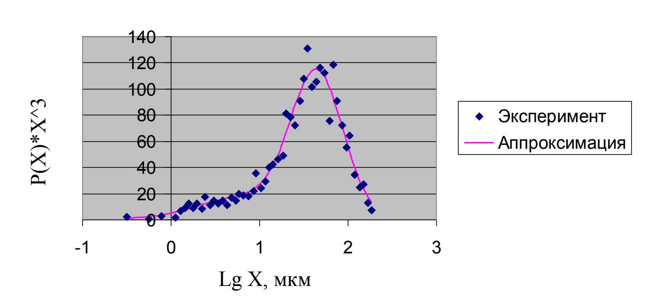


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных двойным логнормальным распределением

На рис 3 представлена аппроксимация экспериментальных данных логнормальным распределением:

$$P(x) = 0.563 \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg x - 1.63}{0.435}\right)^2}.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 1,23, коэффициент корреляции с экспериментальными точками — 0,970.

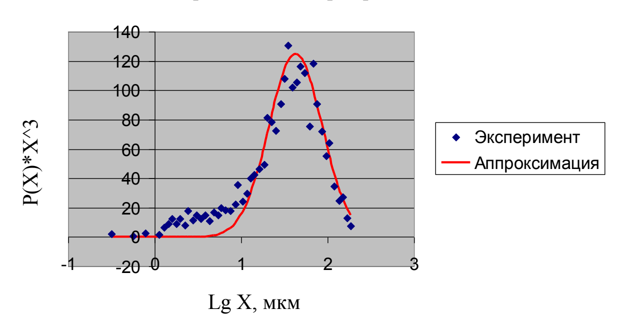


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных данных логнормальным распределением

Также изучалась возможность приблизить экспериментальные данные распределениями Розина — Раммлера:

- классическим обобщенным трехпараметрическим:

$$P(x, D, n, m) = (x/D)^m \cdot \mathrm{e}^{-(x/D)^n} / \int (x/D)^m \cdot \mathrm{e}^{-(x/D)^n} dx);$$

- упрощенным экспоненциальным:

$$P(x) = 1/ D \cdot \mathrm{e}^{-x/D}, n = 1.$$

На рис. 4 представлена аппроксимация экспериментальных данных распределением Розина — Раммлера:

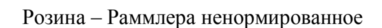
$$P(x) = 7{,}73 \cdot 10^{-3} \cdot x^{0.322} \cdot \exp[-(x/48{,}89)^{1.322}].$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0,47, коэффициент корреляции с экспериментальными точками — 0,972.

На рис. 5 — аппроксимация экспериментальных данных трехпараметрическим распределением типа Розина — Раммлера:

$$P(x) = 6{,}66 \cdot 10^{-3} \cdot x^{0.4} \cdot \exp[-(x/66{,}18)^{1.235}].$$

Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0,51, коэффициент корреляции — 0,972.



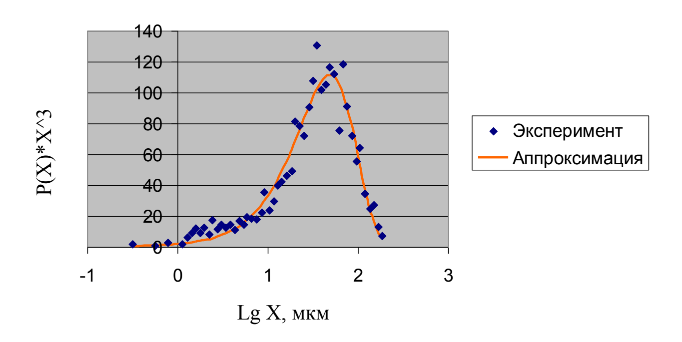


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных данных распределением Розина — Раммлера

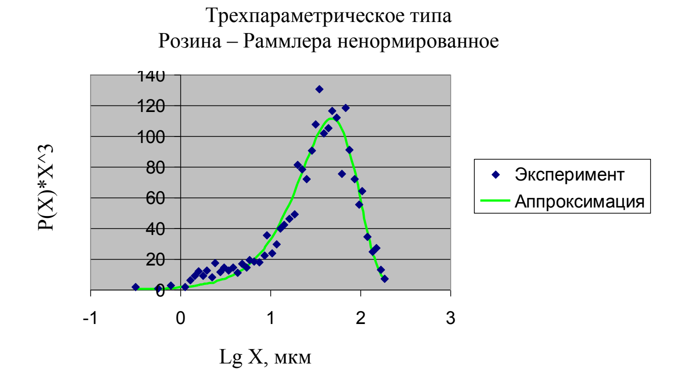


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных данных
трехпараметрическим распределением типа Розина — Раммлера

Из проведенного анализа следует, что для задач, отличных от расчетов циклонов, экспериментальные данные авторов удобно аппроксимировать однопараметрической монотонно убывающей функцией: $P(x) = 1/D{\cdot}e^{-x/D}$ На рис. 6 представлена аппроксимация экспериментальных данных экспоненциальным распределением $P(x) = 1/47.13{\cdot}e^{-x/47.13}$. Среднеквадратичная относительная погрешность составляет 0,42, коэффициент корреляции с экспериментальными точками — 0,948.

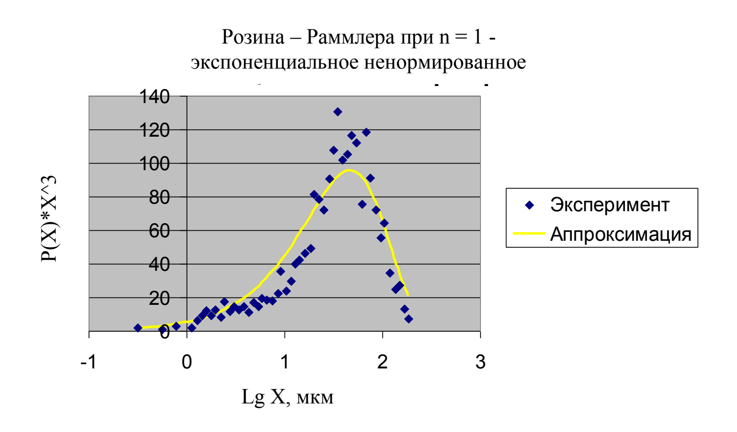


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных экспоненциальным распределением

В табл. 2 приведены интегральные показатели дисперсности пыли, рассчитанные на основе модельных распределений в сопоставлении с оцененными программными средствами прибора *Fritsch Analysette* 22 *Compact*. Модельные распределения инициализированы по графическим данным.

Таблица 2

Интегральные показатели дисперсности пыли

Параметр	Математическая модель, использованная для оценки					Фактическое значение
	Логнормальное	Двойное логнормальное	Розина — Раммлера трехпараметрическое	Розина — Раммлера	Экспоненциальное	
D_{43}, мкм	51,7	44,8	44,7	45,2	43,6	43,5
D_{42}, мкм	41,2	23,0	27,3	28,1	21,4	20,9
D_{41}, мкм	32,0	9,45	12,2	12,9	8,61	8,18
D_{40}, мкм	25,0	4,87	5,99	6,32	4,40	4,24
D_{32}, мкм	32,8	11,8	16,6	17,5	10,3	10,0
D_{31}, мкм	25,2	4,34	6,4	6,92	3,79	3,55
D_{30}, мкм	19,6	2,32	3,07	3,28	2,03	1,95
D_{21}, мкм	19,4	1,59	2,46	2,74	1,39	1,25
D_{20}, мкм	15,1	1,03	1,32	1,42	0,904	0,858
D_{10}, мкм	11,8	0,666	0,704	0,738	0,586	0,588
Мода, мкм	52,1	45,2	48,9	48,4	43,9	43,4
СКО σ, мкм	35,0	37,2	33,6	33,8	39,9	35,7
Асимметрия	1,49	1,17	1,19	1,20	1,41	1,25
Эксцесс	2,28	1,49	1,46	1,50	1,66	1,66

Данные рис. 4–6 и табл. 2 позволяют сопоставить соответствующие результаты между собой и с данными аппроксимации логнормальной и двойной логнормальной функциями. Эти результаты свидетельствуют о близком качестве аппроксимации, достигаемом с использованием пятипараметрического двойного логнормального, трехпараметрического типа Розина — Раммлера, двухпараметрического классического типа Розина — Раммлера и однопараметрического экспоненциального модельных распределений $P(x)$. В то же время логнормальное распределение не соответствует опытным данным, поскольку не отражает присутствие в пыли существенной числовой доли очень мелких частиц. Вместе с тем это распределение лучше прочих соответствует практической цели работы — оптимизации системы воздухоочистки.

Аппроксимация однопараметрической монотонно убывающей функцией $P(x) = 1/ D \cdot e^{-x/D}$ демонстрирует хорошее согласие с экспериментом для малоразмерных фракций пыли, которые вследствие представительности существенно влияют на среднеквадратичную относительную погрешность аппроксимации.

Выводы. Выполненный авторами анализ экспериментальных данных относительно распределения образующихся при резании рельса частиц по размерам сводится к следующему:

1. Прибор *Fritsch Analysette* 22 *Compact* не является оптимальным для исследования фракционного состава пыли поскольку не представляет данных измерений в первичной числовой форме. Оцифровка предоставляемых этим прибором графиков служит главным источником погрешности в интерпретации соответствующих данных.

2. Для детального анализа распределения пылевых частиц по размерам на основе доступных (имеющихся у авторов) экспериментальных данных лучше прочих подходит простейшее экспоненциальное распределение частиц по размерам $P(x) = 1/47{,}13\cdot e^{-x/47{,}13}$. На основе этого распределения можно верно воспроизвести все интегральные показатели, предоставляемые инструментальным измерительным комплексом, наряду с графическими данными.

3. Задачи воздухоочистки требуют использовать классическое логнормальное распределение:

$$P(x) = 0{,}563 \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg x - 1.63}{0.435}\right)^2},$$

параметры которого вычислены авторами методами математического программирования. Они позволили рассчитать важную для проектирования циклонов величину D_{32} = 32,8 мкм, втрое превышающую числовое значение, выдаваемое прибором *Fritsch Analysette* 22 *Compact.* Это означает, что ориентация в расчете циклона на предоставляемые названным прибором числовые значения приведет к неспособности удалять из рабочей зоны практически все крупные частицы.

4. Ввиду того, что на эффективность циклона влияет не только величина D_{32}, но и плотность дисперсного материала, состоящего из стали и абразива, для обеспечения эффективности воздухоочистки требуется уточняющий анализ. Его предметом является раздельное исследование дисперсности металлической и абразивной пыли, возникающей в результате работы рельсорезного станка.

Библиографический список

1. Страус, В. Промышленная очистка газов : пер. с англ. / В. Страус. — Москва : Химия, 1981. — 616 с.

2. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин. — Москва : Экопресс — 3М, 1998. — 505 с.

3. J. Sauter. Grössenbestimmung von Brennstoffteilchen // Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. — 1926. — Heft 279.

4. J. Sauter. Untersuchung der von Spritzvergasern gelieferten Zerstäubung // Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. — 1928. — Heft 312.

5. H. Wadell. Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles // J. Geology. — 1935. — Vol. 43, no. 3. — P. 250-280.

6. Адушкин, В. В. Анализ мелкодисперсной фракции при разрушении горных пород взрывом и образовании скальных оползней / В. В. Адушкин, С. И. Попель, С. И. Шишаева // Записки Горного института. — 2007. — Т. 171. — С. 32–38.

7. T. Hatch, S.P. Choate Statistical description of the size properties of non-uniform particulate substances // J. Franklin Inst. — 1929. — Vol. 207. — P. 369–387.

8. W. Kaye, J.B. McDaniel Low-Angle Laser Light Scattering – Rayleigh Factors and Depolarization Ratios // Applied Optics. — 1974. — Vol. 13, iss. 8. — P. 1934–1937.

9. Бочкарева, Е. А. Сравнительный анализ программ оцифровки графиков / Е. А. Бочкарева // Современные научные исследования и инновации. — 2015. — № 11. — URL : http://web.snauka.ru/issues/2015/11/60095 (дата обращения : 02.02.2020).

10. Шарапова, Э. Н. Система оцифровки графических данных / Э. Н. Шарапова, В. Л. Дмитриев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. — 2011. — № 1–2. — С. 166–171.

11. Grafula — оцифровка координат точек отсканированных графиков для переноса их в *Excel* : Математическое моделирование. — URL : https://mmodelling.blogspot.com/2012/07/excel.html (дата обращения : 02.02.2020).

12. M. Minoux Mathematical Programming: Theory and Algorithms. New York: John Wiley, 1986. — 489 p.

Сдана в редакцию 22.01.2020
Запланирована в номер 02.03.2020

Об авторах:

Азимова Наталья Николаевна, ст. преподаватель кафедры «Прикладная математика», аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9484-2430, arkomaazimov@mail.ru

Ладоша Евгений Николаевич, начальник управления цифровых образовательных технологий ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7955-5073, Ladoscha@mail.ru

Холодова Светлана Николаевна, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9690-7154, holls9@mail.ru

Цымбалов Денис Сергеевич, ст. преподаватель кафедры «Электротехника и электроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/ 0000-0003-1409-1815, Den.tsymbalov@mail.ru

Яценко Олег Вадимович, доцент кафедры «Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2873-6944, oleg_v_yatcenko@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Азимова Н.Н. — анализ предметной литературы, выбор цели исследования, постановка задач, планирование и организация совместной работы; экспериментальные исследования распределения пыли по размерам методом LALLS, выбор и анализ модельных распределений; количественная оценка адекватности использованных моделей, их корректировка, анализ возможностей применять методику для объектов, подобных изученному, а также совершенствовать ее в части надежности и универсальности; составление текста статьи (30 %); *Ладоша Е.Н.* — оцифровка данных, параметрическая идентификация моделей на основе графических экспериментальных распределений с использованием статистических методов и электронных таблиц Excel (15 %); Х*олодова С.Н* — экспертиза результатов технического эксперимента (первичных данных о дисперсном составе пыли) и использованных моделей на предмет адекватности; сопоставление и анализ моделей дисперсности в части качественного и количественного соответствия экспериментальным данным; выработка предложений по развитию методики физического и математического анализа для высокоточной идентификации распределения пыли по размерам (15 %); *Цымбалов Д.С.* — параметрическая идентификация моделей на основе интегральных показателей экспериментальных распределений с использованием методов математического программирования (оптимизации) и пакета MathCAD (15 %); *Яценко О.В.* — количественная оценка адекватности использованных моделей, их корректировка, анализ возможностей применять методику для объектов, подобных изученному, а также совершенствовать ее в части надежности и универсальности; корректировка текста статьи (25 %).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-192(075.8) https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-79-86

Численное моделирование и экспериментальные оценки характеристик выносливости элементов конструкций



Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. В алгоритме прогнозирования ресурса элементов машин взаимодействуют модели внешнего воздействия, сопротивления разрушению и развития во времени того или иного вида повреждения этих элементов. Рассматриваются прикладные вопросы сопротивления элементов машин усталостному разрушению. Выполняется адаптация научных исследований и нормативных материалов по определению характеристик выносливости к специфике конструкций и материалов строительно-дорожных машин и сельхозтехники. Цель работы — с помощью анализа существующих методов разработать рекомендации по расчетному определению параметров выносливости конструктивных элементов сельхозмашин.
Материалы и методы. Исходными данными послужили научные исследования механики разрушения машиностроительных материалов и конструкций, а также стандарты по методам определения характеристик выносливости. Необходимость апробации методов определения характеристик выносливости для использования в проектах строительно-дорожных машин и сельхозтехники вытекает из специфики их конструкций, условий работы и отраслевых сортаментов материалов. На основе анализа существующих методов необходимо разработать рекомендации по расчетному определению параметров выносливости конструктивных элементов сельхозмашин. Для этого элементы несущих систем ступенчатой конструкции были представлены в виде набора пластин соответствующей толщины, а также использована концепция критического радиуса концентратора напряжений в местах сварки. Применены численные методы с использованием математических моделей. Проверка результатов расчетов проведена путем сравнения их с экспериментально определенными характеристиками выносливости элементов зерноуборочного комбайна на испытательном стенде.
Результаты исследования. Получены критические значения радиуса концентраторов напряжений для различных видов сварных швов. Таблицы расчетных и экспериментальных пределов выносливости несущих элементов комбайна хорошо коррелируются и могут использоваться при проектировании.
Обсуждение и заключения. Теоретические основы, заложенные в работе, открывают широкие возможности для приложений к проектированию различных машин. Рассмотренный фрагмент адаптации теоретического подхода к объектам сельскохозяйственного машиностроения может использоваться при проектировании несущих систем в смежных областях машиностроения.

Ключевые слова: предел выносливости, усталостное разрушение, усталостная трещина, сварное соединение, расчетно-экспериментальные методы.

Образец для цитирования*:* Маньшин, Ю. П. Численное моделирование и экспериментальные оценки характеристик выносливости элементов конструкций / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 79−86. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-79-86



Numerical modeling and experimental estimates of structural member fatigue characteristics

Yu. P. Man'shin, E. Yu. Man'shina
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. In the algorithm for predicting the resource of machine parts, models of external actions, fracture resistance, and temporal development of a particular type of damage to these units interact. The applied issues of the resistance of machine parts to fatigue failure are considered. The scientific research and regulatory materials are adapted to determine the characteristics of endurance to the specifics of structures and materials of the construction-and-road machinery and agricultural machinery. The work objective is to use the analysis of existing methods to develop recommendations for the calculated determination of the endurance parameters of structural members of the agricultural machines.
Materials and Methods. The initial data were scientific studies on the fracture mechanics of the engineering materials and structures, as well as standards for endurance characterization methods. The need to test methods for determining fatigue characteristics to use them in the road construction machinery and agricultural machinery projects follows from the specifics of their designs, operation conditions and industry-specific range of materials. Based on the analysis of existing methods, it is required to develop recommendations for the calculation of the endurance parameters of structural parts of the agricultural machines. For this, the components of the load-bearing systems of the staged design were presented in the form of a set of plates of the corresponding thickness; and the concept of the critical radius of the stress raiser at the welding sites was also used. Numerical methods using mathematical models were applied. The calculation results were verified through comparing them to experimentally determined fatigue characteristics of the members of a combine harvester on a test bench.
Results. Radius critical values of the stress raisers for various types of welds are obtained. The tables of the calculated and experimental endurance limits of the combine bearing components are well correlated and can be used under designing.
Discussion and Conclusions. The theoretical foundations laid down in the study open up great opportunities for applications to the design of various machines. The considered fragment of adaptation of the theoretical approach to the agricultural engineering objects can be used in the design of load-bearing systems in the related fields of engineering.

Keywords: endurance range, fatigue fracture, fatigue crack, weld joint, computational and experimental methods.

For citation: Yu.P. Man'shin, E.Yu. Man'shina. Numerical modeling and experimental estimates of structural member fatigue characteristics. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 79−866. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-79-86

Введение. В расчетном и экспериментально-расчетном методах прогнозирования долговечности силовых конструкций наземных мобильных машин массового производства (автомобили, тракторы, строительно-дорожные, гидромелиоративные, сельскохозяйственные, военная техника и др.) рекомендуется в качестве основного критерия надежности принимать начало образования усталостной трещины длиной 0,2–0,5 мм в условиях многоциклового разрушения[1]. При этом исходной информацией о свойствах конструкции является характеристика кривой усталости. Рассмотрим возможность развития методов определения характеристик сопротивления усталости деталей машин[2].

Элементы конструкции представляются состоящими из пластин и работающими на растяжение-сжатие. Концентрация напряжений вызывается резким изменением толщины пластин с определенным радиусом кривизны ρ в местах перехода, вплоть до резкого надреза. Концентрация напряжений, связанная с образованием сварного шва на рассматриваемых пластинах, считается предметом самостоятельных исследований и учитывается как результат.

Правильный выбор параметров сопротивления усталостному разрушению деталей машин и несущих систем является основой расчетов ресурсов и прогнозирования надежности [1]. Рассмотрим методику и результаты расчетного определения характеристик сопротивления усталости элементов (зон) несущей конструкции на основе модели, представленной на рис. 1.

[1] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : Справочник. М. : Машиностроение, 1985. 224 с.
[2] МР 206–86. Расчеты и испытания на прочность. Методы определения характеристик сопротивления усталости деталей машин с учетом рассеяния : Методические рекомендации / Всесоюзный научно-исследовательский институт по стандартизации в машиностроении. М. : ВНИИНмаш, 1986. 50 с.

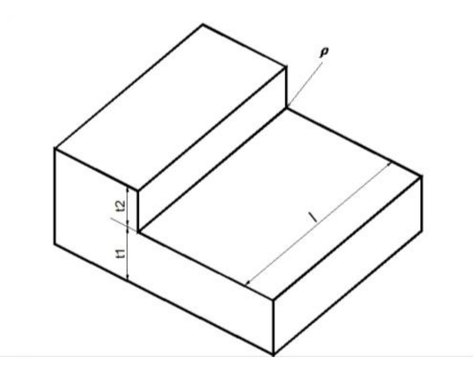


Рис. 1. Схема к расчетному определению характеристик сопротивления усталости

Модель представляет собой фрагмент сварного соединения из толстостенных элементов. Она типична для многих самоходных и прицепных машин наземного транспорта, например, рамно-каркасной системы самоходных комбайнов. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для определения характеристик выносливости соединения деталей, представленных на рис. 1

Вариант	1	2	3	4
Марка стали	09Г2	09Г2	20	20
Условия работы		коррозия		коррозия
$\bar{\sigma}_b$, МПа	460	460	420	420
$\bar{\sigma}_T$, МПа	300	300	250	250
$\bar{\sigma}_{-1}$, МПа	232	232	213	213
$V_{\sigma-1}$	0,069	0,069	0,062	0,062
$K_{F\sigma}$	0,85	0,55	0,85	0,58
K_V	0,50	0,50	0,50	0,50
K_A	0,95	0,95	0,95	0,95
$t_1 = t_2$, мм	10	10	4	4
ρ, мм	0,1–2	0,1–2	0,1–2	0,1–2
$\bar{\rho}$, мм	0,5	0,5	0,5	0,5
V_ρ	0,36	0,36	0,36	0,36
l, мм	200	200	80	80

Медианное значение предела выносливости вычисляется по выражению[1, 2]:

$$\bar{\sigma}_{-1g} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{K},$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ — медианное значение предела выносливости, определяемого на гладких лабораторных образцах стандартного диаметра $d_0 = 7,5$ мм; K — коэффициент снижения предела выносливости:

$$K = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \frac{1}{K_V K_A},$$

где $K_\sigma = \dfrac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1g}}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжения; $K_{d\sigma}$ — коэффициент влияния абсолютных размеров; $K_{F\sigma}$ — коэффициент влияния состояния поверхности; K_V — коэффициент влияния поверх-

[1] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Указ. соч. С 112–224.
[2] ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости / Государственный комитет СССР по стандартам. Режим доступа : URL:http://docs.cntd.ru/document/1200012858 (дата обращения : 11.12.2019).

ностного разупрочнения от металлургических процессов сварки; K_A — коэффициент анизотропии свойств материала.

Для рассматриваемого примера воспользуемся рекомендациями [2]. Примем $K_V = 0,5$, $K_A = 0,95$. Для нормальных условий эксплуатации примем $K_{F\sigma} = 0,85$. При эксплуатации или хранении машины с попаданием пресной воды, влаги и образованием коррозии примем для стали 09Г2 по ГОСТ 5521–93 $K_{F\sigma} = 0,55$, для стали 20 по ГОСТ 2591–2006 $K_{F\sigma} = 0,58$. Исходные данные для расчета выносливости образцов и их коэффициентов вариации $V_{\sigma-1}$ приведены в табл. 1.

Для определения характерных отношений параметров методика[1] рекомендует формулу:

$$\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} = \frac{\alpha_\sigma}{0,5\zeta},$$

где α_σ — теоретический коэффициент, определяющий степень возрастания напряжений в зоне их концентрации, рассчитывается по местному напряженно-деформированному состоянию с помощью конечно-элементных моделей; ζ — параметр распределения.

Уравнение подобия усталостного разрушения близко по форме к распределению Вейбулла. Для пластинчатых элементов имеет вид[2]:

$$J = -2,31\lg(1-p) = \frac{t_1 + t_2}{\overline{G}_1}\left(\frac{u}{z}\right)^{\beta} \frac{1}{(\beta+1)(\beta+2)} \cdot \frac{(\zeta-1)^{\beta+2}}{\zeta^2}, \quad (1)$$

где $\overline{G}_1$ — градиент первого главного напряжения, определяется по формуле:

$$\overline{G}_1 = 23/\rho; \ \left(\frac{u}{z}\right)^{\beta} = 0,0152(\beta+1),$$

здесь V_σ — чувствительность металла к концентрации напряжений:

$$V_\sigma = 0,2 - 0,0001\sigma_b;$$

$$\beta = \frac{1}{V_\sigma} - 0,64.$$

Медианное значение параметра $\bar{\zeta}$ получим при вероятности разрушения $P = 0,5$ из решения уравнения подобия (1). Для рассматриваемых деталей значения $\bar{\zeta}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры сопротивления усталости конструкции (рис. 1)

Вариант	1	2	3	4
$\rho_{кр}$, мм	0,5	0,5	0,5	0,5
$\overline{\alpha}_\sigma$	2,2	2,2	1,7	1,7
$V_{\alpha\sigma}$	0,19	0,19	0,22	0,22
$\bar{\zeta}$	2,12	2,12	2,51	2,51
V_σ	0,154	0,154	0,158	0,158
β	5,85	5,58	5,69	5,69
$\overline{G}_1$, 1/мм	4,6	4,6	4,6	4,6
$K_\sigma / K_{d\sigma}$	2,07	2,07	1,35	1,35
K	4,74	6,09	3,22	4,57
θ	0,49	0,49	0,20	0,20
$V_{\sigma\max}$	0,05	0,05	0,06	0,06
$V_{\sigma-1g}$	0,21	0,21	0,24	0,24
ΔK_{th}, МПа	9,53	9,53	9,53	9,53

[1] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.
[2] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.

Средний градиент напряжений в зоне радиуса ρ, которая является местом концентрации, определен для условия:

$$\rho = (\rho_{кр}) \approx 0,5 - 0,0004(\sigma_b - 500).$$

Для рассматриваемых сталей установлено критическое значение радиуса кривизны в соединении деталей $\rho_{кр}$ = 0,5 мм. Ему соответствует образование не распространяющихся в дальнейшем трещин усталости[1]. По данному критерию проведен выбор величины α_σ. На рис. 2 представлены зависимости теоретического коэффициента концентрации напряжений от радиуса кривизны для различных геометрических параметров конструкции. Вычисленные медианные значения пределов выносливости для рассматриваемых деталей представлены в табл. 3.

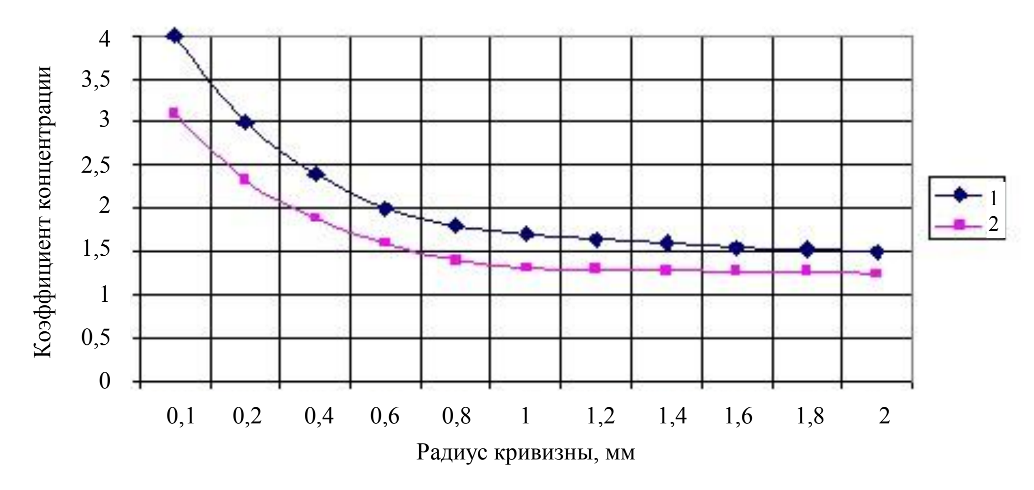


Рис. 2. Зависимости теоретического коэффициента концентрации напряжений от радиуса кривизны:
1 — $t_1 = t_2$ = 10 мм; 2 — $t_1 = t_2$ = 4 мм

Таблица 3

Расчетные характеристики сопротивления усталости деталей, представленных на рис. 1 по исходным данным табл. 1

Вариант	1	2	3	4
$\tilde{\sigma} - 1g$	49	38	66	46
$(\sigma - 1g)P = 0,05$, МПа	32	25	40	28
$(\sigma - 1g)P = 0,95$, МПа	66	51	92	64
m	4,54	3,52	6,36	4,48
$N_\sigma, 10^6$ *циклов*	2,9	2,6	2,9	2,7
$\psi\sigma$	0,11	0,11	0,10	0,10
$\sigma - 1_{gкр}$, МПа	34	-	-	-

Коэффициент вариации предела выносливости определен по выражению:

$$V_{\sigma-1g} = \sqrt{V_{\sigma\max}^2 + V_{\sigma-1}^2 + V_{\alpha\sigma}^2}, \quad (2)$$

где $V_{\sigma\max}$ — коэффициент вариации максимальных напряжений в зоне концентрации; $V_{\sigma-1}$ — коэффициент вариации предела выносливости образца; $V_{\alpha\sigma}$ — коэффициент вариации теоретического коэффициента в зоне концентрации.

Коэффициент вариации $V_{\sigma-1}$ задан[2] и представлен в табл. 1 в виде исходных данных. Коэффициент вариации $V_{\sigma\max}$ определяется по выражению[3]:

[1] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Указ. соч. С. 112–224.
[2] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Указ. соч. С. 112–224.
[3] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.

$$V_{\sigma\max} = \frac{0,1}{1+\theta^{\nu\sigma}},$$

где θ — относительный критерий подобия усталостного разрушения:

$$\theta = \frac{1}{88,3\bar{G}_1}.$$

Расчетные величины параметров приведены в табл. 2. Коэффициент вариации $V_{\alpha\sigma}$ определяется по рекомендациям[1]:

$$V_{\alpha\sigma} = \left|\frac{\partial\alpha_\sigma}{\partial\rho}\right|_{\rho=\bar{\rho}} \cdot \frac{\bar{\rho}}{\alpha_\sigma} V_\rho.$$

Для нахождения модуля производной осуществляется линейная аппроксимация функции $\alpha_\sigma = \varphi(\rho/t)$, которая представлена на рис. 2 в окрестностях среднего значения параметра $\bar{\rho}$. Результаты вычисления приведены в табл. 2. Там же содержатся результаты вычисления коэффициента вариации предела выносливости по выражению (2).

Определим значения предела выносливости в предположении его нормального распределения с вероятностью разрушения 5 % и 95 % по формуле:

$$(\sigma_{-1g})_P = \bar{\sigma}_{-1g}(1+Z_P V_{\sigma-1g}),$$

где Z_P — квантиль нормального распределения. В табл. 3 приведены значения предела выносливости с указанными вероятностями разрушения.

Далее приведем зависимости для расчета параметров кривой усталости:

- показатель наклона левой ветви кривой усталости[2]:

$$m = \left(5+\frac{\sigma_b}{80}\right)/K_\sigma;$$

- абсцисса точки кривой усталости:

$$N_\sigma = 10^5 \bar{\sigma}_{-1g}^{(0,997-0,003m)};$$

- коэффициент чувствительности к асимметрии цикла[3]:

$$\psi_\sigma = 0,02 + 2\cdot 10^{-4}\sigma_b.$$

Результаты расчета этих характеристик для рассматриваемых деталей приведены в табл. 3.

Исследованиями установлено[4], что в зонах концентрации напряжений существуют критические радиусы кривизны в диапазоне значений $\rho_{кр}$ = 0,1–0,6 мм [1]. При $\rho < \rho_{кр}$ имеют место другие закономерности подобия усталостного разрушения по сравнению с областью $\rho > \rho_{кр}$. В этом случае рассматривается трещиноподобный предельно острый надрез, характерный для зон сварных швов соединяемых деталей в различных отраслях машиностроения [3, 4]. Рекомендуется[5] определить два предела выносливости:

1. Предел выносливости σ_{-1g} при $\rho > \rho_{кр}$. Он определяется по критериям появления первых микроскопических трещин усталости и зависит от радиуса кривизны.

2. Предел выносливости окончательного разрушения $\sigma_{-1gкр}$ при $\rho < \rho_{кр}$. Он не зависит от радиуса кривизны надреза и определяется по формуле:

$$\sigma_{-1gкр} = \frac{11,5\Delta K_{th}}{\sqrt{t+\rho_{кр}}},$$

где ΔK_{th} — порог развития усталостных трещин; t — глубина ступеньки в зоне концентратора напряжения.

Порог развития усталостных трещин для малоуглеродистых сталей с учетом коэффициента асимметрии ориентировочно можно определить по формуле[6]:

[1] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.
[2] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.
[3] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Указ. соч. С. 112–224.
[4] Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Указ. соч. С. 112–224.
[5] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.
[6] МР 206–86. Указ. норм. док. 1986. 50 с.

$$\Delta K_{th} \approx 6{,}74\sqrt{1-R}\,. \qquad (3)$$

Параметр ΔK_{th} для рассматриваемых деталей указан в табл. 2 при $R=1$. Вычисленные по выражению (3) значения $\sigma_{-1gкр}$ приведены в табл. 3.

Для оценки правомерности расчета усталости элементов конструкций, представленных в виде пластин с различными радиусами перехода в зонах соединения вплоть до предельно острого надреза, проведены стендовые испытания натурных образцов. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4

Экспериментальные характеристики сопротивления усталости металлоконструкций зерноуборочных машин

Зона сварки	m			(σ_{-1g}), МПа			(σ_{-1g}) P = 0,05 МПа		(σ_{-1g}) P = 0,95 МПа		$V_{\sigma-1g}$	$N_{\sigma}\cdot 10^6$ циклов
	min	среднее	max	min	среднее	max	по среднему	по min	по среднему	по max		
Фланца и корпуса моста ведущих колес	3,2	3,7	4,3	31	37	43	4	4	70	81	0,54	3,7
Кронштейна КПП и корпуса ведущих колес	3,1	3,9	4,7	31	39	47	24	19	54	65	0,23	3,6
Опорной плиты и корпуса моста ведущих колес	3,5	4,1	4,8	33	38	43	21	18	55	62	0,27	3,9
Стойки каркаса	4,2	4,9	5,6	38	45	52	35	29	55	64	0,14	4,1

Для проведении стендовых испытаний выбрана самая высокая группа точности при относительной погрешности $0{,}1 \le \varepsilon \le 0{,}2$, доверительная вероятность $\beta = 0{,}8$. Число испытуемых конструкций находилось в диапазоне 11–14 ед.

Данные табл. 4 показывают большие разбросы эмпирических оценок. Даже если исключить из рассмотрения зону сварки фланца и балки моста ведущих колес, разброс значений для которой вызван нестабильностью технологического процесса, в заданном доверительном интервале величина σ_{-1g} отличается в 1,8–2,9 раз.

Выводы. Сравнение расчетных (табл. 3) и экспериментальных (табл. 4) характеристик сопротивления усталости в зонах сварных соединений показывает их хорошую сопоставимость. Интервалы доверительной вероятности экспериментальных значений перекрывают аналогичные интервалы расчетных значений для зон моста ведущих колес. Средние значения для условий нормальной работы отличаются в 1,3 раза, а при коррозии совпадают. Для металлоконструкций каркаса расчетные значения по нормальным условиям отличаются в 1,5 раза, а по условиям коррозии практически совпадают. Хорошее соответствие реальным значениям показывают величины $\sigma_{-1gкр}$, вычисленные по порогу развития усталостных трещин.

Представленные материалы позволяют сделать вывод о достаточной достоверности на этапе прогнозирования долговечности использования расчетных характеристик сопротивления усталости по предлагаемой методике. Корректные характеристики сопротивления усталости при известном или полученном из полевого эксперимента распределении могут служить фундаментом для расчета ресурса конструкции с требуемой вероятностью безотказной работы, вытекающей из технического задании для соответствующей машины [5].

Таким образом, путем анализа существующих методов разработаны рекомендации по расчетному определению параметров выносливости конструктивных элементов сельхозмашин. При доработке проекта или опытного образца изделия до нормативной долговечности с помощью конструктивных и технологических при-

ёмов характеристики сопротивления усталости используются в методах приближенных и функциональных оценок ресурса [6, 7].

Библиографический список

1. Спиченков, В. В. Современные методы расчетной оценки силовых конструкций / В. В. Спиченков, А. Б. Шостенко ; Ростовский институт автоматизации и технологии машиностроения // Разработка конструкций и исследование технологических процессов сельскохозяйственных машин : сб. статей. — Ростов-на-Дону, 1993. — С. 69–75.

2. Кеше, Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы / Г. Кеше. — Москва : Металлургия, 1984. — 400 с.

3. Ефремов, Л. В. Практика инженерного анализа надежности судовой техники / Л. В. Ефремов. — Ленинград : Судостроение, 1980. — 175 с.

4. Лукинский, В. С. Прогнозирование надежности автомобилей / В. С. Лукинский, Е. И. Зайцев. — Ленинград : Политехника, 1991. — 222 с.

5. Маньшин, Ю. П. Вопросы надежности деталей при проектировании механических систем / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 2019. — № 5. — С. 56–73.

6. Маньшин, Ю. П. Приближенная оценка ресурса детали, обеспечивающая ее требуемый ресурс с заданной вероятностью безотказной работы / Ю. П. Маньшин, Е. Ю. Маньшина // Вестник машиностроения. — 2017. — № 12. — С. 20–24.

7. Man'shin Yu.P. Estimating the Life of a Machine Part / Yu.P. Man'shin, E. Yu. Man'shina// Russian Engineering Research. — 2018. — Vol. 38, no. 3. — P. 157-162.

Сдана в редакцию 17.01.2020
Запланирована в номер 28.02.2020

Об авторах:

Маньшин Юрий Павлович, доцент кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-2246-2965, manshin@mail.ru

Маньшина Елена Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3027-1309, elemans@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Е. Ю. Маньшина — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; Ю. П. Маньшин — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.785: 669.14.018.29 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-87-92

Адаптация структур зон лазерной закалки стали к условиям трения



А. В. Бровер
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Рассмотрено структурное состояние поверхностных слоев машиностроительных изделий, изготовленных с применением лазерной обработки на различных режимах облучения. Реализованы структуры с максимально возможной стабильностью по отношению к внешнему воздействию в условиях трения, либо с возможностью оптимальной перестройки и дополнительного упрочнения при эксплуатации путем образования вторичных структур. В условиях эксплуатации под влиянием механических и тепловых импульсов происходит экспрессная перестройка одной структуры в другую, устойчивую на более высоком уровне нагрузочно-скоростных условий. Таким образом, реализуется явление структурно-энергетической приспосабливаемости. Образующиеся адаптируемые структуры наиболее эффективно рассеивают вводимую в трибосистему энергию и минимизируют износ пар трения.

Материалы и методы. Исследовались образцы из стали Р6М5 помощью следующей аппаратуры:

- технологическая установка Квант-16 с плотностью мощности 100 МВт/м^2 для импульсного лазерного облучения образцов;
- оптический микроскоп *Neophot*-21 для металлофизических исследований;
- дифрактометр ДРОН-0,5 для идентификации фазового состава.

Результаты исследования. Установлено, что материал образцов после лазерной обработки способен эффективно рассеивать подводимую при трении энергию с помощью его преобразований на различных структурных уровнях. В результате появляется возможность целевого управления поверхностной прочностью и износостойкостью материалов, используя концепцию структурной приспосабливаемости пар трения, что расширяет их диапазон работоспособности. Износостойкость облученных сталей определяется как их исходной твердостью, так и способностью к деформационному упрочнению в процессе трения. Установлено, что температурно-силовое нагружение поверхностных облученных слоев сталей при трении дестабилизирует аустенит к $\gamma \to \alpha$ превращению, т. е. способствует превращению его в мартенсит деформации.

Обсуждение и заключения. Применительно к конкретным условиям нагружения необходимо регулировать количество и степень стабильности остаточного аустенита в лазерно-закаленных сталях и сплавах, что обеспечивает получение необходимых эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: лазерное облучение, машиностроительные материалы, износостойкость, структурная приспосабливаемость, поверхностная прочность.

***Образец для цитирования**:* Бровер, А. В. Адаптация структур зон лазерной закалки стали к условиям трения / А. В. Бровер // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 87–92. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-87-92



Adaptation of structures of steel laser hardening zones to friction conditions

A.V. Brover
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The structural state of the surface layers of engineering products manufactured through laser processing under various irradiation modes is considered. Structures with the highest possible stability with respect to external action under friction conditions, or with the possibility of optimal adjustment and additional hardening during operation by the formation of secondary structures, were implemented. Under the operating conditions, under the impact of me-

chanical and thermal pulses, an express rearrangement of one structure to another occurs, which is stable at a higher level of load-speed conditions. Thus, the phenomenon of structural-energy adaptability is realized. The resulting adaptable structures most efficiently dissipate the energy introduced into the tribosystem, and minimize the wear of friction pairs.

Materials and Methods. We studied samples of P6M5 steel using the following equipment:

- Kvant-16 processing station with a power density of 100 MW/m^2 for pulsed laser irradiation of samples;
- *Neophot*-21 optical microscope for metal physical studies;
- DRON-0.5 diffractometer for phase composition identification.

Results. It is established that the material of the samples after laser treatment is able to efficiently dissipate the energy supplied during friction through its transformations at various structural levels. As a result, it becomes possible to control the surface strength and wear resistance of materials using the concept of structural adaptability of friction pairs, which extends their range of performance. Wear resistance of the irradiated steels is determined by both their initial hardness and the work-hardenability during friction. It is established that the thermal-strength loading of the steel surface irradiated layers during friction destabilizes austenite to the $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation, i.e., it contributes to its transformation into deformation martensite.

Discussion and Conclusions. In relation to the specific loading conditions, it is required to regulate the amount and degree of stability of the residual austenite in laser-hardened steels and alloys, which provides the necessary operational properties.

Keywords: laser irradiation, machine building materials, wear resistance, structural adjustability, surface strength

For citation: A.V. Brover. Adaptation of structures of steel laser hardening zones to friction conditions. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 87–92. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-87-92

Введение. Для повышения эффективности упрочняющих технологий, в том числе лазерной обработки, необходимо определить возможности целенаправленного использования внутренних резервов структурной приспосабливаемости изделий различного функционального назначения из сталей и сплавов в условиях эксплуатации [1–8]. Следует проанализировать особенности структурно-энергетического состояния лазерно-облученных материалов в парах трения и определить актуальные направления повышения износостойкости трибосистем.

При лазерной обработке использовались несколько путей трансформации структуры для целевого изменения свойств материалов [9–12]:

- повышение дисперсности структуры при локальной пластической деформации в результате динамической полигонизации в аустените, формирования микрообластей (фрагментов) высокой плотности дислокаций, наследуемых при ускоренном охлаждении, а также в результате фазового наклепа при полиморфном превращении;
- образование наноразмерных выделений под влиянием пластической деформации в процессе термического воздействия;
- развитие деформации в облученных зонах мартенсита при внешнем температурно-силовом нагружении.

Необходимо учитывать, что структурное превращение с одной стороны является механизмом деформационного упрочнения, обусловленного возрастанием объема мартенсита, а с другой стороны приводит к релаксации микронапряжений и дополнительному развитию пластической деформации. Эти два фактора действуют одновременно и являются конкурирующими [13–15]. В случае преобладания первого фактора в сталях обеспечивается высокая прочность при удовлетворительной пластичности. Если доминирует второй фактор, существенно возрастает пластичность стали при сохранении на достаточном уровне предела прочности. При оптимальном сочетании действия факторов мартенситное превращение при нагружении обеспечивает получение наилучшего комплекса механических свойств материала [16, 17].

Постановка задачи. Рассматривались проблемы конструирования адаптируемых структур сплавов, обладающих заданными эксплуатационными характеристиками, с использованием лазерного облучения на оптимальных режимах. Использовались следующие пути диссипации энергии, накачиваемой посредством лазерной обработки и в процессе последующего температурно-силового трибовоздействия:

- трансформация части энергии в тепло;
- диссипация за счет движения дефектов кристаллического строения и пластической деформации;
- диссипация при структурно-фазовых превращениях на разных масштабных уровнях.

Последний структурный фактор имеет определяющее значение для повышения эксплуатационных свойств изделий, если формирующиеся при лазерном воздействии структуры обладают приспосабливаемостью к условиям эксплуатации [18–19]. Целенаправленно формируемые при лазерной обработке адаптируемые мар-

тенситно-аустенитные структуры с заданным соотношением составляющих должны эффективно рассеивать энергию в зонах трения за счет внутренних преобразований, особенно при достижении пиковых нагрузок. Это возможно при лазерном облучении на оптимальных режимах и является предпосылкой повышения надежности и долговечности изделий.

Целью настоящей работы явилось получение научных знаний о возможности реализации в зонах лазерной обработки сталей и сплавов структур, адаптирующихся к температурно-силовому нагружению в процессе трения и повышающих тем самым износостойкость изделий.

Материалы и методы. В работе проводились металлофизические исследования образцов из инструментальной стали Р6М5 с использованием оптического микроскопа *Neophot*-21, дифрактометра ДРОН-0,5, твердомера ПМТ-3. Лазерное облучение осуществлялось на установке импульсного действия Квант-16 с плотностью мощности излучения 80–150 МВт/м^2. Испытания на изнашивание проводили на установке МИ-1М по схеме «диск — колодка» при нагрузке 500 Н с линейной скоростью скольжения 190 м/мин. Образцы в виде дисков проходили полный цикл объемной термической обработки — подвергались закалке и трехкратному отпуску. Часть дисков облучалась по боковой поверхности шириной 10 мм. Контртелами служили вкладыши из стали ШХ15, имеющие твердость НВ 130–180. Износ дисков до и после лазерного облучения определяли по потере массы путем периодического взвешивания на аналитических весах с точностью 10^{-4} г.

Результаты исследования. Металлографический и дюрометрический анализы упрочненных образцов показали, что после лазерной обработки на поверхности формируется закаленный слой глубиной 80–120 мкм. Результаты испытаний на изнашивание, представленные на рис. 1, демонстрируют явное преимущество сталей после поверхностной лазерной обработки. Причем за счет приработки пар трения и структурных изменений на контактирующих поверхностях с увеличением времени испытаний преимущество увеличивается в 13 раз.

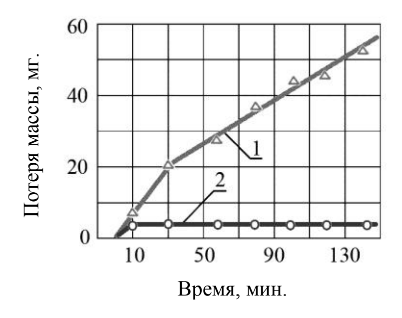


Рис. 1. Кривые износа образцов из стали Р6М5 после закалки при температуре 1280 °С и 3-х кратного отпуска (1), после лазерной закалки (2)

Рассмотрим особенности структурных и фазовых превращений, реализуемых в поверхностных слоях лазерно-закаленных образцов в процессе трения и приводящих в конечном счете к повышению износостойкости материала. Проведены рентгеноструктурные исследования лазерно-облученных образцов стали Р6М5 до и после испытаний на износостойкость в течение 15-и мин и 150-и мин. Результаты представлены на рис. 2 в виде фрагментов рентгенограмм, снятых с поверхностей до и после трения.

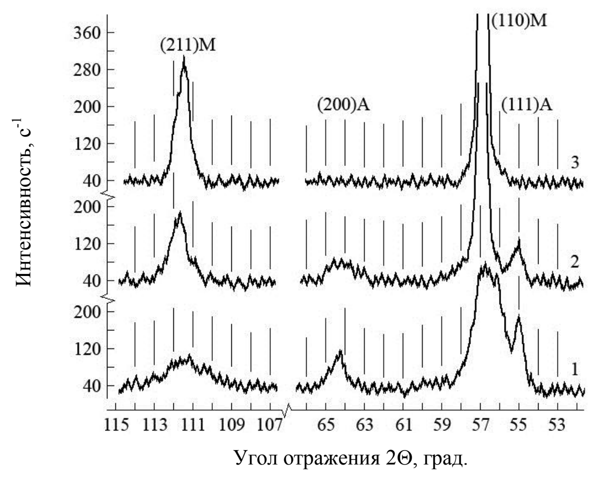


Рис. 2. Фрагменты рентгенограмм стали Р6М5: 1 — после лазерной закалки; 2 — после лазерной закалки и испытаний на изнашивание в течение 15-и мин.; 3 — после лазерной закалки и испытаний на изнашивание в течение 150 мин.

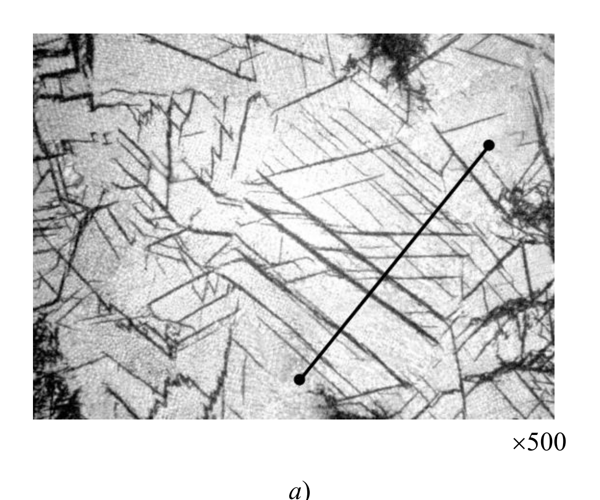
До испытаний на изнашивание поверхностные слои стали после лазерной закалки имеют двухфазное аустенитно-мартенситное строение (рис. 2, кривая 1). Причем интенсивность рефлексов аустенита, а, следовательно, и его количество в структуре, значительно уменьшаются с увеличением времени испытаний (рис. 2, кривые 2, 3). Объясняется это тем, что рассмотренные условия температурно-силового нагружения дестабилизируют аустенит к мартенситному превращению за счет выделения из него легированных карбидов. В результате обеднения γ-фазы углеродом она приобретает способность к превращению в мартенсит деформации со свойствами аналогичными мартенситу охлаждения. При этом обеспечивается технологическая и конструкционная пластичность поверхностных слоев стали (микроТРИП-эффект).

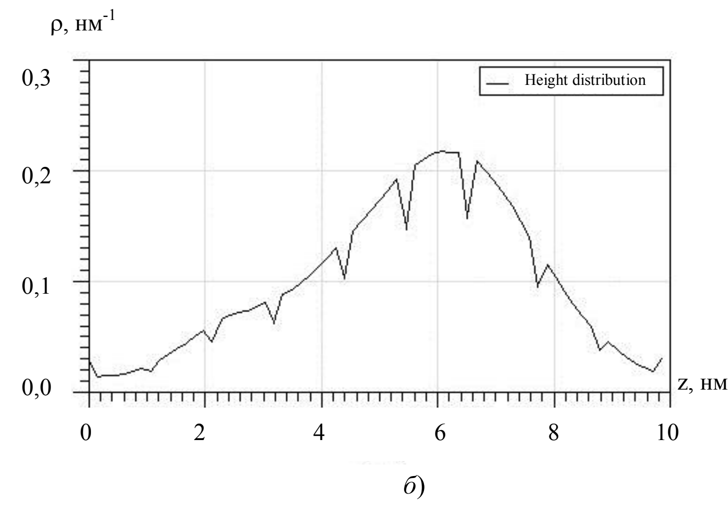
Следует отметить, что мартенсит, полученный лазерной закалкой, под действием температур и усилий в зонах трения также трансформируется за счет деформационного упрочнения в процессе изнашивания (рис. 2, кривые 2, 3). Подтверждением является увеличение ширины рефлексов мартенсита на рентгенограммах, вызванное повышением плотности дислокаций и измельчением блоков его тонкого строения. В результате дополнительно повышается твердость и эксплуатационные характеристики лазерно-облученной стали. Таким образом, при трении протекает процесс адаптации структуры облученных поверхностных слоев к условиям нагружения в паре трения, что приводит к повышению твердости и износостойкости сталей после лазерной обработки.

Изменением режима облучения достигалось разное количество мартенсита и аустенита в лазерно-закаленных зонах и устанавливалась связь между развитием фазовых превращений в процессе самоорганизации структур и свойствами сталей. Результаты металлофизических исследований показали, что лазерную обработку стали Р6М5 необходимо проводить с плотностью мощности в интервале 80–120 МВт/м^2. В этом случае достигается максимально возможное упрочнение стали на уровне 10–11,5 ГПа, что приводит к повышению износостойкости облученных поверхностей. Дополнительным фактором повышения износостойкости стали в условиях трения без смазки служит сохранение в зонах лазерной обработки до 30 % нерастворившихся карбидов вольфрама, ванадия, хрома.

Установлено, что под действием высоких температур и давлений в зонах контакта лазерно-облученного металла происходит дополнительное выделение дисперсных карбидов упрочняющего действия [20, 21]. Этому способствует высокая плотность дислокаций в сталях как непосредственно после лазерной обработки, так и дополнительно возникающих при трении.

На рис. 3, *а* представлена микроструктура облученной стали Р6М5 после испытаний на изнашивание. Здесь нанесена реперная линия, вдоль которой определялась гистограмма распределения высот профиля поверхности, изображенная на рис. 3, *б*. Линия пересекает дисперсные выделившиеся карбиды. Из гистограммы следует, что карбиды имеют размеры в диапазоне 2–10 нм.





а) *б*)

Рис. 3. Строение лазерно-закаленной стали Р6М5: *а* — результаты оптической микроскопии; *б* — гистограмма распределения высот профиля поверхности

Обращает на себя внимание ориентированное по линиям скольжения выделение дисперсной карбидной фазы в результате испытаний на трение. Образующаяся таким образом текстура дисперсных выделений приво-

дит к понижению потерь на трение при эксплуатации изделий различного функционального назначения после лазерной обработки.

Обсуждение и заключения. Отметим особенности двухфазных аустенитно-мартенситных зон облученных сталей при разных видах изнашивания. Рассмотренные в работе результаты получены в условиях трения без смазки. При абразивном изнашивании неоднородные структуры лазерной закалки обладают меньшей износостойкостью по сравнению с полностью мартенситными структурами, что объясняется интенсивным изнашиванием аустенитной структурной составляющей. В условиях адгезионного изнашивания, а также при трении со смазкой, двухфазные структуры зон лазерной закалки характеризуются высокой износостойкостью. В данном случае участки мартенсита выполняют роль прочного каркаса, а изнашиваемые участки аустенита образуют на рабочей поверхности микрополости, удерживающие смазку и улучшающие условия трения.

Таким образом, для повышения износостойкости необходимо конструировать адаптируемую к условиям эксплуатации структуру с определенным соотношением объемов мартенсита, аустенита и карбидов путем выбора оптимального режима лазерной обработки. Перспективны варианты лазерного модифицирования поверхностных слоев сталей карбидами или нитридами легирующих элементов, либо проведение лазерной закалки и последующего отпуска, температура которого зависит от марки стали.

Выводы:

1. Определены возможности целенаправленного использования внутренних резервов структурной приспосабливаемости сталей и сплавов после лазерной поверхностной обработки для повышения их износостойкости в условиях трения.

2. Выполнен анализ структурно-фазовых превращений в лазерно-облученных зонах сталей при температурно-силовом нагружении пар трения. Показано, что повышению износостойкости материалов способствуют процессы трансформации остаточного аустенита лазерной закалки в мартенсит деформации, деформационное упрочнение мартенсита, полученного при лазерной термообработке, множественное выделение в облученных зонах сталей дисперсных карбидов упрочняющего действия.

3. Изменением режимов лазерной обработки сталей возможно формирование в облученных зонах адаптируемых мартенситно-аустенитных структур с заданным соотношением составляющих, эффективно рассеивающих энергию в зонах трения за счет структурных преобразований на разных уровнях.

Библиографический список

1. Гинберг, А. М. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А. М. Гинберг, А .Ф. Иванов. — Москва : Машиностроение, 1982. — 42 с.

2. Кравченко, Г. Н. Влияние пластического деформирования дробью и циклического нагружения на свойства поверхностного слоя стали 30ХГСН2А / Г. Н. Кравченко, В. В. Алексеев // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1986. — № 9. — С. 23–25.

3. Григорьянц, А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. — Москва : Высшая школа, 1987. — 191 с.

4. Макклинток, Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф. Макклинток, А. Аргон. — Москва : Мир, 1970. — 443 с.

5. Панин, В. Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В. Е. Панин, В. А. Лихачев, Ю. В. Гриняев. — Новосибирск : Наука, 1985. — 226 с.

6. Любарский, И. М. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. — Москва : Металлургия, 1976. — 175 с.

7. Рыбакова, Л. М. Металловедение в науке о трении и изнашивании / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1985. — № 5. — С. 16–23.

8. Марченко, Е. А. О природе разрушения поверхности металлов при трении / Е. А. Марченко. — Москва : Наука, 1979. — 117 с.

9. Горбач, В. Г. Мартенситно-аустенитные стали как эффективный инструментальный и конструкционный материал / В. Г. Горбач, И. В. Сидорук, Е. А. Измайлов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1988. — № 8. — С. 9–12.

10. Бровер, А. В. Структурные особенности процесса поверхностного упрочнения стали концентрированными потоками энергии / А. В. Бровер // Материаловедение. — 2005. — № 9. — С. 18–23.

11. Бровер, А В. Комплекс механизмов упрочнения металлических материалов при импульсной лазерной обработке / А. В. Бровер // Перспективные материалы. — 2008. — № 1. — С. 63–69.

12. Бровер, А. В. Эффекты структурно-энергетической приспосабливаемости поверхностно термоупрочненной стали при трении / А. В. Бровер // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 5. — С. 43–47.

13. Тушинский, Л. И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л. И. Тушинский. — Новосибирск : Наука, 1990. — 305 с.

14. Серебряков, В. Г. Влияние деформации на механические свойства двухфазной аустенитно-мартенситной стали / В. Г. Серебряков, Э. И. Эстрин // Физика металлов и металловедение. — 1992. — № 2. — С. 130–133.

15. Малинов, Л. С. Влияние метастабильного остаточного аустенита на механические свойства стали Х12М / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1988. — № 8. — С. 12–15.

16. Бернштейн, М. Л. Структура и субструктура аустенита, образующегося при нагреве закаленных и термомеханически упрочненных сталей / М. Л. Бернштейн, Л. М. Капуткина, С. Д. Прокошкин // Физика металлов и металловедение. — 1982. — Т. 54, № 6. — С. 150–157.

17. Буше, Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. — Москва : Наука, 1981. — 127 с.

18. Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. — Москва : Машиностроение, 1991. — 207 с.

19. Бекренев, А. Н. Самоорганизация металлической системы при ее неквазистационарной релаксации / А. Н. Бекренев, А. Ю. Безуглов // Физика и химия обработки материалов. — 1995. — № 2. — С. 122–127.

20. Портной, К. И. Дисперсноупрочненные материалы / К. И. Портной, Б. Н. Бабич. — Москва : Металлургия, 1974. — 199 с.

21. Попов, А. А. Влияние деформации на выделение карбида $M_{23}C_6$ в аустенитной стали / А. А. Попов, В. М. Фарбер, Б. М. Бронфин // Физика металлов и металловедение. — 1974. — Т. 38, № 2. — С. 337–343.

Сдана в редакцию 13.01.2020
Запланирована в номер 21.02.2020

Об авторах:

Бровер Андрей Владимирович, доцент кафедры «Физическое и прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3999-3703, brover@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 621.893 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-93-99

Автоматическое распознавание автомобильных номерных знаков



А. В. Полтавский[1], Т. Г. Юрушкина[2], М. В. Юрушкин[3]
[1, 3] ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Статья посвящена задаче автоматического обнаружения и распознавания автомобильных номеров, решение которой имеет множество потенциальных применений, начиная от обеспечения безопасности и заканчивая управлением трафиком на дорогах. Целью данной работы являлась разработка интеллектуальной системы нахождения и распознавания автомобильных номеров, основанной на применении алгоритмов глубокого обучения и сверточных нейронных сетей, учитывающей различные региональные стандарты автомобильных номеров, и устойчивой к различным расположениям камеры, качеству видео, освещению, погодным условиям и деформациям номерных знаков.

Материалы и методы. Предложен комплексный подход к решению задачи, основанный на применении сверточных нейронных сетей. Проведен экспериментальный анализ нейросетевых моделей, обученных под требования задачи универсального распознавания номерного знака. На его основании были выбраны модели, показывающие лучшее соотношение качества и быстродействия. Качество системы обеспечивается оптимизацией различных моделей с различными модификациями. В частности, сверточные нейронные сети обучались с использованием изображений из нескольких наборов данных. Кроме того, для получения наилучших результатов используемые модели были предобучены на специально сгенерированном синтетическом датасете.

Результаты исследования. В статье приведены численные эксперименты, результаты которых свидетельствуют о превосходстве разработанного алгоритма над коммерческим пакетом OpenALPR на публичных наборах данных. В частности, на наборе данных 2017-IWT4S-HDR_LP-dataset точность распознавания номерных знаков составила 94 процента, а на наборе данных Application-Oriented License Plate 86 процентов.

Обсуждение и заключения. Полученный алгоритм может быть использован для автоматического обнаружения и распознавания автомобильных номеров. Проведенные эксперименты показали, что качество алгоритма не уступает качеству коммерческого пакета OpenALPR. Качество разработанного алгоритма можно увеличивать за счет увеличения тренировочного датасета, что не требует участия разработчика.

Ключевые слова: обнаружение и распознавание объектов, сверточные нейронные сети, генерация и аугментация данных, распознавание номерных знаков.

Образец для цитирования: Полтавский, А. В. Автоматическое распознавание автомобильных номерных знаков / А. В. Полтавский, Т. Г. Юрушкина, М. В. Юрушкин // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т.20, №1. — С. 94−100. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-93-99



Automatic license-plate recognition

A. V. Poltavskii[1], T. G. Yurushkina[2], M. V. Yurushkin[3]
[1,3] Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The problem of automatic license plate recognition is considered. Its solution has many potential applications from safety to traffic control. The work objective was to develop an intelligent recognition system based on the application of deep learning algorithms, such as convolution neural networks that consider automotive standards for license plates in various countries and continents, and are tolerant to camera locations and quality of input images, as well as to changing lighting, weather conditions, and license plate deformations.
*Materials and Methods***.** An integrated approach for the problem solution based on the application of convolution neural network composition is proposed. An experimental analysis of neural network models trained to meet the requirements of the universal license plate recognition task was conducted. Based on it, models that showed the best ratio of quality and speed were selected. Quality of the system is provided through the optimization of various models with different modifications. In particular, convolution neural networks were trained using images from several datasets. In addition, to obtain the best results, the models used were pre-trained on a specially generated synthetic dataset.
Results. The paper presents numerical experiments, the results of which imply the superiority of the developed algorithm over the commercial OpenALPR package on public datasets. In particular, on the 2017-IWT4S-HDR_LP-dataset, license plate recognition accuracy was 94 percent, and on the Application-Oriented License Plate dataset, 86 percent.
Discussion and Conclusions. The resulting algorithm can be used to automatically detect and recognize license plates. The experiments show that the algorithm quality meets or exceeds quality of the commercial OpenALPR package. The developed algorithm quality can be improved through increasing the training dataset, which does not require the participation of the developer.

Keywords: object detection and recognition, convolution neural networks, data generation and augmentation, license plate recognition

For citation: A.V. Poltavskii, T.G. Yurushkina, M.V. Yurushkin. Automatic license-plate recognition. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 94−100. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-93-99

Введение. Системы автоматического распознавания номеров (ALPR) используются для автоматического контроля скорости движения, идентификации угнанных транспортных средств, контроля доступа транспортных средств в частных помещениях и взимания платы за проезд[1] [1, 2, 3]. Однако большинство существующих алгоритмов[2, 3] работают только для конкретного шаблона номерного знака или со сложными системами захвата изображений, требовательны к условиям освещения и типам транспортных средств [4, 5, 6].

Благодаря быстрому развитию глубинного обучения и его приложений в области компьютерного зрения [7] стало возможным создание системы ALPR, способной распознавать многочисленные шаблоны номерных знаков в произвольной среде[4,5,6] [8]. Основными трудностями при распознавании номерных знаков являются особенности условий съемки — наличие дождя, снега или плохое освещение. Задача распознавания становится более сложной, если номерной знак имеет нетривиальные площадь и соотношение сторон, цвет фона, форму, количество линий, размер шрифта, расстояние между символами и т. д.

Целью данной работы являлась разработка системы распознавания автомобильных номеров, поддерживающей различные региональные стандарты номерных знаков, и не зависящей от условий видеосъемки автомобилей, таких как грязь на номерах, погодные условия и т.д.

[1] Lotufo RA, Morgan AD, Johnson AS. Automatic number-plate recognition. IEEE Colloquium on Image Analysis for Transport Applications. Feb., 1990. P. 1–6.
[2] Du S, et al. Automatic license plate recognition (ALPR): A state-of-the-art review. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2013;23(2):311–325.
[3] Gou C., et al. Vehicle license plate recognition based on extremal regions and restricted Boltzmann machines. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016;17(4):1096–1107.
[4] Hsu G., Chen J., Chung Y. Application-oriented license plate recognition. IEEE Trans. Veh. Technol. 2013;62(2):552–561.
[5] Li H., Shen C. Reading car license plates using deep convolutional neural networks and lstms. 2016. arXiv preprint arXiv:1601.05610.
[6] Yuan Y., et al. A robust and efficient approach to license plate detection. IEEE Transactions on Image Processing. 2017;26(3):1102–1114.

Материалы и методы. Автоматическая система детекции и распознавания автомобильных номеров. В рамках данного раздела дается описание программной реализации системы обнаружения транспортного средства на фотографии, нахождения в нем номерного знака и его распознавания.

Предлагаемая система состоит из композиции нескольких нейросетевых моделей. Идея композиции заключается в том, что на вход следующей модели подается результат выполнения предыдущей, а весь процесс анализа разбивается на этапы. Схематически принцип работы системы представлен на рис. 1:



Рис. 1. Трехэтапный подход в задаче обнаружения и распознавания номерных знаков

Первый этап работы алгоритма заключается в обнаружении транспортного средства. Для решения этой задачи использовалась модель SSD Resnet[1], обученная на наборе данных COCO (Common Objects in Context)[2]. Результатом работы данной модели являются фрагменты входного изображения, которые включают в себя транспортные средства. На втором этапе полученные фрагменты подаются на вход разработанной модели детекции автомобильных номеров, которая возвращает фрагменты изображения, включающие только автомобильные номера. На заключительном этапе производится распознавание символов, образующих автомобильный номер, и их склейка. Подробное описание разработанных моделей, используемых во втором и третьем этапе работы алгоритма, приведено в соответствующих разделах статьи.

Выбранный подход обладает следующими преимуществами:

Отсекаются объекты, которые могут восприниматься как номерной знак: вывески на витринах магазинов, окнах или ограждениях;

Становится возможным установить взаимосвязь между номером и соответствующим транспортным средством, предусматривая расширение системы в сторону распознавания других характеристик, таких как вид, марка и модель транспортного средства, цвет и направление движения, отслеживание в видеопотоке;

Сохраняется модульность системы, состоящей из независимых моделей, специализирующихся в решении конкретной задачи на высоком уровне.

Модель детекции номеров. Начальный набор данных для тренировки модели представлял из себя 1700 изображений индийских автомобилей, снятых под определенным углом. Обученная на данном наборе модель не являлась вариативной к разным условиям, поэтому был применен метод псевдолейблинга[3] для неразмеченных наборов данных (изображений с транспортными средствами). Таким образом, изначальный набор данных для тренировки был увеличен до 400 тысяч изображений. Размер набора данных для валидации равен 5% от набора для тренировки. Изображения выбирались случайно и проверялись на правильность разметки координат номерного знака.

Для оценки качества модели использовались метрики IoU (Intersection over Untion), mAP (mean Average Precision) и AR (Average Recall)[4]:

'DetectionBoxes_Precision/mAP': точность классов, усредненная по пороговым значениям IoU в диапазоне от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05;

[1]Tensorflow detection model zoo. Available at: http://download.tensorflow.org/models/object_ detection/ssd_resnet50_v1_fpn_shared_box_predictor_640x640_coco14_sync_2018_07_03.tar.gz (accessed: 03.11.2019).
[2] COCO — Common Objects in Context. Available at: http://cocodataset.org/#home (accessed: 03.11.2019).
[3] Pseudo-Labeling and Confirmation Bias in Deep Semi-Supervised Learning / E. Arazo [et al.]. 2019. 8 Aug. // arXiv preprint arXiv:1908.02983.
[4] mAP (mean Average Precision) for Object Detection. Available at: https://medium.com/@jonathan_hui/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173 (accessed: 30.10.2019).

'DetectionBoxes_Precision/mAP@.50IOU': средняя точность классов по значению IoU равному 0,5;

'DetectionBoxes_Precision/mAP (small)': средняя точность классов для маленьких объектов (площадь < 32^2 пикселя);

'DetectionBoxes_Precision/mAP (medium)': средняя точность классов для объектов (32^2 пикселя < площадь < 96^2 пикселя);

'DetectionBoxes_Precision/mAP (large)': средняя точность классов для больших объектов (96^2 пикселя < площадь < 10000^2 пикселя).

Таблица 1

Результат mAP на валидационных данных

Задача / task	Модель / model	mAP	mAP@.50IOU	mAP@.75IOU	mAP (small)	mAP (medium)	mAP (large)
Обнаружение номерных знаков / License plate detection	SSD MobileNet v1 FPN	0,8292	0,9843	0,9739	0,7199	0,8197	0,8544

Полученная модель устойчива к размеру входного изображения (таблица 1), обнаруживает номерные знаки под наклоном, а также с нетривиальным соотношением сторон.

Модель распознавания номеров. Задача распознавания номерного знака сводится к задаче детекции объектов 36 классов: 26 букв латинского алфавита верхнего регистра и 10 цифр.

Начальный набор данных для обучения модели представлял из себя 1700 изображений индийских автомобилей. Валидация происходила на 10% от начального набора, состоящих преимущественно из трудночитаемых изображений, размеченных вручную.

За отсутствием в достаточном количестве размеченных наборов данных, удовлетворяющим требованиям обучения модели распознавания номеров, было принято решение сгенерировать синтетический набор данных. В качестве аугментаций использовались такие преобразования как поворот, размытие и затемнение, а также различные размеры и цветовые раскраски номерного знака, начертания шрифтов, расстояния между символами (рис. 2).



Рис. 2. Примеры генерируемых изображений

Модель обучалась на синтетическом наборе данных, включающем 300 тысяч изображений. Для повышения точности и количества реальных данных для обучения модели была применена техника псевдолейблинга, увеличившая набор реальных данных до 250 тысяч. Точность распознавания на валидационном наборе данных выросла на 15%, достигнув отметки в 63% (рис. 4). Этот рост обусловлен присутствием в реальных изображениях артефактов, недоступных при генерации.

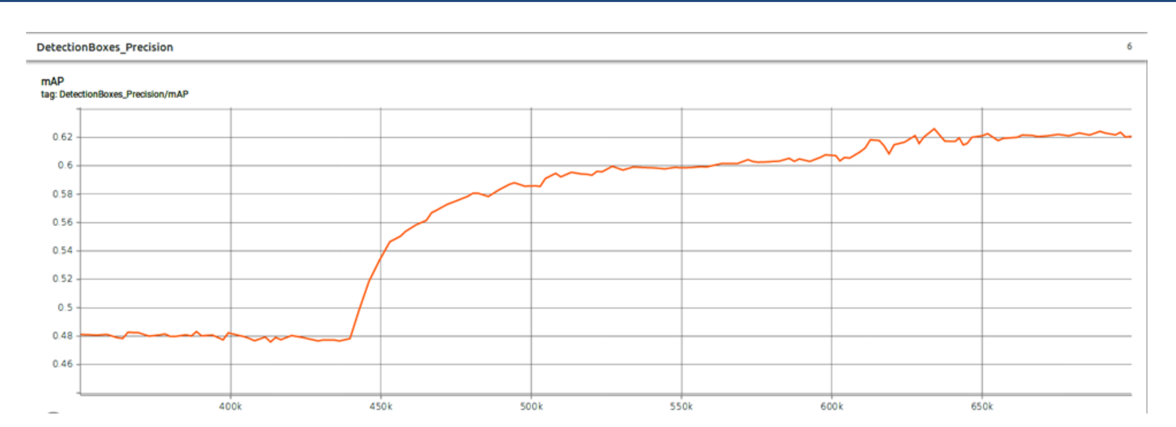


Рис. 3. Результаты mAP модели до и после добавления реальных наборов данных

Таблица 2

Сравнение mAP моделей на валидационных данных

Задача / task	Модель / model	mAP	mAP@,50IOU	mAP@,75IOU	mAP (small)	mAP (medium)	mAP (large)
Распознавание номерных знаков / License plate recognition	Faster R-CNN Resnet-101	0,4783	0,9372	0,3578	0,4689	0,5251	0,5543
		0,6332	0,9503	0,7228	0,6009	0,6397	0,7051
	Faster R-CNN Inception v2	0,5567	0,9534	0,6113	0,5569	0,6094	0,6493
		0,5784	0,9652	0,6184	0,5583	0,6157	0,6676

Результаты исследования. В полученной комбинации нейросетевых моделей каждый из классификаторов независимо обучался с использованием изображений из нескольких наборов данных, включающих в себя номерные знаки стран всех континентов и методов увеличения этих наборов для достижения устойчивости в различных условиях[1, 2].

Для оценки результатов обнаружения номерных знаков использовалась метрика IoU. Для задачи распознавания символов номерного знака правильно размеченным считалось то изображением, в котором все символы в номерном знаке были распознаны корректно. Лишний, отсутствующий или некорректно распознанный символ считались ошибкой на всем номере.

Сравнение результатов проводилось с последней облачной версией коммерческого пакета OpenALPR[3] и с упомянутым выше исследованием 2016 года[4]. Тестирование проводилось на наборе данных 2017-IWT4S-HDR_LP-dataset (таблица 3), предоставленном в исследовании[5] и Application-Oriented License Plate (AOLP) (таблица 4), предоставленном в исследовании[6], включающим в себя 2049 изображений с тайваньскими номерными знаками. Они подразделялись на три подмножества с различным уровнем сложности и условиями фотографирования: Access Control (AC), Law Enforcement (LE) и Road Patrol (RP).

1 Pseudo-Labeling and Confirmation Bias in Deep Semi-Supervised Learning.
2 Nowruzi FE, et al. How much real data do we actually need: Analyzing object detection performance using synthetic and real data. 2019. arXiv preprint arXiv:1907.07061.
3 OpenALPR Cloud API. Available at: https://api.openalpr.com/v2/ (accessed: 02.11.2019).
4 Li H., Shen C. Op. cit.
5 Hsu G., Chen J., Chung Y. Op. cit.
6 Li H., Shen C. Op. cit.

Таблица 3

Численный эксперимент на публичном наборе данных 2017-IWT4S-HDR_LP-dataset

Метрики / metrics	**ours**	**OpenALPR**
Количество корректно распознанных номерных знаков / Number of correct license plate recognitions	619 / 653	377 / 653
Процент корректно распознанных номерных знаков / Percent of correct license plate recognitions	94,79	57,73

Таблица 4

Численный эксперимент на публичном наборе данных

Метрики / metrics	Применяемые решения / Applied solutions	Подмножество AC / Subset AC (%)	Подмножество LE / Subset LE (%)	Подмножество RP / Subset RP (%)
IoU обнаружения номерного знака / plate detection	ours	95,58	93,97	94,29
	OpenALPR	91,80	86,89	90,84
	[12] 1st approach(with CNN I)	93,53	89,83	86,58
	[12] 1st approach(with CNN II)	93,25	90,62	86,74
	[12] 1st approach(with CNN I & II)	93,97	92,87	87,73
	[12] 2st approach(with global features only)	90,50	91,15	83,98
	[12] 2st approach(with both local and global features)	94,85	94,19	88,38
Количество корректно распознанных номерных знаков / number of correct letter recognitions:	ours	88,75	83,94	85,40
	OpenALPR	86,04	77,98	85,71

Обсуждение и заключения. Были построены модели для обнаружения и распознавания номерных знаков транспортных средств. Согласно численным экспериментам, модель для обнаружения номеров оказалась точнее решений, полученных в 2016 и 2019 годах[1,2] на наборе данных, опубликованных в 2013 году[3]. Модель распознавания автомобильных номеров оказалась точнее решения 2019 года[4] на наборе данных, полученных в 2017 году [8]. Для увеличения точности моделей были использованы методы генерации синтетических данных и

[1] Li H., Shen C. Op. cit.
[2] OpenALPR Cloud API.
[3] Hsu G., Chen J., Chung Y. Op. cit.
[4] OpenALPR Cloud API.

псевдолейблинга. Полученная система оказалась устойчивой к размеру входного изображения и особенностям среды.

Библиографический список

1. Bernstein, D. Automatic vehicle identification: technologies and functionalities / D. Bernstein, A. Y. Kanaan // Journal of Intelligent Transportation System. — 1993. — 1 (2). — P. 191–204.

2. Development of vehicle-license number recognition system using real-time image processing and its application to travel-time measurement / K. Kanayama [et al.] // IEEE Vehicular Technology Conference. — May, 1991. — P. 798–804.

3. Kessentini, Y. A two-stage deep neural network for multi-norm license plate detection and recognition / Y. Kessentini, M.D. Besbes, S. Ammar, A. Chabbouh // ExpertSystems with Applications. — 2019. — Vol. 136. — P. 159–170.

4. Tian, J. A two-stage character segmentation method for Chinese license plate / J. Tian, R. Wang, G. Wang, J. Liu, Y. Xia // Computers & Electrical Engineering. — 2015. — Vol.46. — P. 539–553.

5. A CNN-based approach for automatic license plate recognition in the wild / M. Dong [et al.] // British Machine Vision Conference (BMVC). — 2017. — P. 1–12.

6. LeCun, Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. — 2015. — Vol. 521, no. 7553. — P. 436–444.

7. Holistic recognition of low quality license plates by CNN using track annotated data / J. Špahel [et al.] // 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS). — 2017. — P. 1–6.

Сдана в редакцию 16.01.2020
Запланирована в номер 05.03.2020

Об авторах:

Полтавский Артем Владимирович, студент кафедры «Алгебра и дискретная математика», Институт математики механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, (344058, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3937-1143, poltavsky@sfedu.ru

Юрушкина Татьяна Геннадьевна, преподаватель кафедры «Естественные науки», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8413-8506, t.yurushkina@gmail.com

Юрушкин Михаил Викторович, старший преподаватель кафедры «Алгебра и дискретная математика», Институт математики механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, (344058, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а), кандидат физико-математических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2477-0459, m.yurushkin@gmail.com

Заявленный вклад соавторов

А. А. Полтавский — исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов, анализ результатов; Т. Г. Юрушкина — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов, анализ результатов; М. В. Юрушкин — формирование основной концепции, цели и задачи, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов, исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 100–105. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 100–105. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 004.891.2 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-100-105

Моделирование информационно-аналитической системы мониторинга производственной безопасности на основе экспертных оценок



О. А. Захарова[1], А. В. Селихина[2], Т. Г. Везиров[3]
[1,2] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[3] ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства» (г. Махачкала, Российская Федерация)

Введение. Исследована математическая модель системы мониторинга производственной безопасности в области машиностроения. Цель работы — создание математической модели на основе экспертных оценок параметров безопасности рабочего места с расчетно-экспериментальным обоснованием ее применимости для экспертной системы мониторинга безопасности «СТРАЖ».
Материалы и методы. Предложена классификация экспертных систем для предприятий машиностроения. Рассмотрены этапы создания экспертных систем. Представлена методика оценки согласованности экспертов как основа для моделей экспертных систем в области безопасности машиностроительных производств.
Результаты исследования. Выявлены основные параметры безопасности рабочего места. Создана матрица экспертной оценки параметров, основанная на мнении ведущих экспертов в области машиностроения. Приведены результаты моделирования экспертной системы «СТРАЖ» с расчетно-экспериментальным подтверждением применимости математической модели. Обоснованы преимущества внедрения экспертных систем для повышения уровня безопасности персонала.
Обсуждение и заключения. Полученные результаты имеют высокую степень согласованности экспертов и могут быть использованы в разработке экспертных систем мониторинга безопасности для предприятий машиностроения.

Ключевые слова: моделирование, экспертные системы, база знаний, экспертная оценка, машиностроение, параметры безопасности, конкордация.

Для цитирования: Захарова, О. А. Моделирование информационно-аналитической системы мониторинга производственной безопасности на основе экспертных оценок / О. А. Захарова, А. В. Селихина, Т. Г. Везиров // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 100−105. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-100-105



Modeling an analytics system for industrial safety monitoring based on expert assessments

O. A. Zakharova[1], A. V. Selikhina[2], T. G. Vezirov[3]
[1,2]Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[3]Dagestan State University of National Economy (Makhachkala, Russian Federation)

Introduction. A mathematical model of the industrial safety monitoring system in mechanical engineering is investigated. The work objective was to create a mathematical model based on expert assessments of workplace safety parameters with a calculated and experimental justification of its applicability to the “STRAZH” expert security monitoring system.
Materials and Methods. The classification of expert systems for engineering enterprises is proposed. The stages of creating expert systems are considered. A methodology for assessing the consistency of experts as a basis for models of expert systems in the field of mechanical facilities safety is presented.
Results. The basic safety parameters of the workplace are identified. A matrix of expert evaluation of parameters based on the opinion of leading experts in the field of engineering is created. The results of modeling the expert system “STRAZH” with the calculated and empirical support of the mathematical model validity are presented. The advantages of implementing expert systems to increase the level of personnel safety are proved.

Discussion and Conclusions. The results obtained have a high degree of expert coordination and can be used in the development of expert safety monitoring systems for engineering enterprises.

Keywords: modeling, expert systems, knowledge base, expert assessment, mechanical engineering, safety parameters, concordance.

For citation: O.A. Zakharova, A.V. Selikhina, T.G. Vezirov. Modeling an analytics system for industrial safety monitoring based on expert assessments. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 100−105. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-100-105

Введение. Трудно формализуемые процессы осложняют полную автоматизацию машиностроительного производства. Умное производство, умное предприятие и аналогичные им структуры реализуются только на базе информационно-аналитических систем (ИАС) с использованием компонентов искусственного интеллекта. В настоящее время в технической и специальной литературе не представлено единое, классическое определение умного производства. Однако специалисты сходятся во мнении, что под «умным производством», «умным предприятием», «умным заводом» (smart factory) понимается прежде всего широкое использование информационных технологий, вычислительных устройств, сенсоров и распределенных сетей для реализации высокоэффективного производственного процесса и обеспечения максимальной безопасности его участников [1].

Современный подход к разработке интеллектуальных ИАС для умного производства предполагает широкое использование новых методов представления знаний и запрограммированных эмпирических алгоритмов их обработки [2].

В первую очередь среди ИАС, используемых в машиностроении, выделим два наиболее перспективных класса.

1. Информационно-управляющие системы (ИУС). Проектируются для мониторинга и управления трудно формализуемых технологических объектов. Обязательные компоненты в структуре ИУС:
— модуль сбора и обработки больших массивов данных (big data) по определенным алгоритмам;
— модуль формирования экспертной оценки [3].

2. Экспертные системы (ЭС). Проектируются для сбора, обработки и анализа формализованного опыта специалистов в конкретной области машиностроения. Обязательные компоненты в структуре ЭС:
— модуль аккумуляции знаний специалистов в конкретной области машиностроения;
— модуль формирования альтернативных сценариев управления в конкретных условиях на основе эмпирического опыта специалистов [4].

ИАС обоих классов представляют собой сложные программные комплексы, создаваемые для тиражирования эмпирического опыта и разработанных на его основе алгоритмов с целью повышения эффективности машиностроительных производств.

База знаний является центральным элементом системы, формирующимся в процессе моделирования, проектирования и эксплуатации ЭС. Главное отличие ЭС от других информационных систем — решение четко ограниченного круга проблем в конкретной области [5]. В отличие от традиционных машинных решений, ЭС используют не процедурный анализ, а обработку дедуктивных рассуждений. Подобные системы могут находить решение плохо определенных и неструктурированных задач [6].

Материалы и методы

ЭС в машиностроении. В современном мире для мониторинга, предупреждения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций используются накопленные, обработанные и проанализированные знания, являющиеся результатом эмпирических исследований нескольких поколений специалистов. В связи с этим ЭС незаменимы при моделировании и предсказании опасных событий.

Информационно-управляющие и ЭС проектируются в два этапа:
— проектирование модуля накопления и структуризации знаний в конкретной области;
— проектирование модуля разработки рекомендаций и принятия управляющего решения на основе конкретных фактов и параметров мониторинга состояния объекта.

Использование ЭС в области охраны труда на предприятиях машиностроения обусловлено необходимостью воспроизведения знаний опытных специалистов-экспертов. Это один из концептуальных этапов развития цифрового производства. С точки зрения пользователей, ЭС актуальны по ряду причин:
— решают различные практические задачи и по результатам не уступают людям-экспертам;
— ориентированы на решение широкого круга задач в неформализованных областях;

— не требуют особых навыков программирования, и работа с ними доступна широкой аудитории квалифицированных пользователей [7].

В машиностроении ЭС помогают принимать решения, управлять объектами, выявлять аварийные ситуации и отказы, проектировать производство. На рис. 1 представлены основные классы задач, решаемых ЭС в машиностроении [8].

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ						
Диагностирование – качества сборки, монтажа машин – промышленного оборудования – производственного потенциала предприятия	**Поддержка Принятия решений** – при планировании ремонтных работ – в оперативном планировании	**Планирование** – объемов производства – задач проектирования	**Контроль и управление** – технологическим процессом изготовления продукции – электротехническим оборудованием	**Мониторинг** – технологического процессом изготовления продукции – оборудования – аварийных ситуаций	**Прогнозирование** – нежелательных событий на потенциально опасных объектах – работоспособности оборудования	**Обучение** – ЭС работы с технологическим оборудованием.

Рис. 1. Основные классы задач, решаемые ЭС в машиностроении

В практике машиностроительных производств для станков ТВ-7, оснащенных функцией контроля точности обработки изделий, используются ЭС типа «Архимед 2008». В процессе технологической обработки для выявления возможных отклонений с помощью системы «Архимед 2008» рассчитываются базовые окружности в поперечных и продольных сечениях детали, геометрические параметры. При этом выявляются проблемы с отклонением профиля продольного сечения, отклонением от округлости, овальности, определяются погрешности размеров, волнистости и др. [9].

Опыт использования ЭС в машиностроении позволил выявить главные преимущества их внедрения:
— рост качества принимаемых решений,
— улучшение качества изготавливаемых изделий,
— увеличение производительности,
— повышение квалификации работников.

Следует заметить, что в машиностроительном производстве целесообразно применять ЭС для решения сложных задач [10].

Ключевое понятие охраны труда в машиностроении — «рабочее место». Это место, где работник должен находиться или куда ему необходимо прибыть в связи с его работой. Оно прямо или косвенно находится под контролем работодателя. Безопасность на рабочем месте регулируется Системой стандартов безопасности труда ССБТ (ГОСТ 12). Следует отметить, что ЭС не позволяют в полной мере контролировать безопасность на рабочем месте.

Для повышения достоверности управляющих решений в модель безопасности рабочего места следует ввести обобщенную экспертную оценку. Ключевой момент в проведении экспертной оценки — выбор компетентных специалистов, имеющих опыт работы в заявленной области и способных к адекватной оценке технологической ситуации [11].

Постановка задачи. На основе анализа предметной области и экспертных оценок разработать математическую модель и провести расчетно-экспериментальное обоснование ее применимости для ЭС мониторинга безопасности «СТРАЖ» («Система точного расчета алгоритмов жизнедеятельности).

Исходные данные. На основе анализа литературных источников и мнения специалистов-практиков были выделены 11 основных параметров безопасности рабочего места.

1. Оснащенность (функциональное наполнение).
2. Соответствие оборудования антропометрическим особенностям работника.
3. Наличие средств индивидуальной и коллективной защиты, а также средств пожаротушения.
4. Доступ на рабочее место и возможность быстрой эвакуации.
5. Исправность производственного оборудования.
6. Выполнение производственных операций согласно требованиям технологической документации.
7. Мониторинг распределенных опасных и вредных факторов.
8. Соблюдение установленного порядка и организованности, высокой производственной, технологической и трудовой дисциплины.
9. Квалификация работника.
10. Своевременное прохождение инструктажей и переподготовки работника.
11. Регулярность мониторинга.

Совокупность данных по основным параметрам безопасности рабочего места позволяет получить такую характеристику рабочего процесса, как напряженность труда. Эта интегрированная характеристика трудо-

вого процесса показывает нагрузку на нервную систему, органы чувств, учитывает эмоциональную составляющую. Напряженность труда нормируется по видам нагрузок: интеллектуальные, сенсорные, эмоциональные, монотонные, режимные.

Разработка математической модели ЭС «СТРАЖ». При разработке математической модели ЭС «СТРАЖ» 21 эксперт оценивал параметры безопасности рабочего места по шкале от 1 до 12 баллов. Опрос проводился с помощью анкетирования. На основе его результатов создана сводная матрица оценки параметров безопасности рабочего места (рис. 2).

ПАРАМЕТРЫ	ЭКСПЕРТЫ																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Исправность производственного оборудования	11	10	11	11	12	11	12	10	11	8	11	10	10	11	12	11	10	11	10	11	7
Доступ на рабочее место и возможность быстрой эвакуа-	10	11	12	10	9	10	7	9	7	5	10	11	12	10	10	7	12	10	11	8	10
Наличие средств индивидуальной защиты и пожаротушения	9	9	9	8	10	9	9	11	9	9	12	9	8	9	9	10	9	9	9	9	11
Соответствие оборудования антропометрии человека	5	6	5	7	5	5	6	5	5	2	5	5	6	4	6	5	6	5	7	5	3
Мониторинг распределенных опасных и вредных факторов	12	12	10	12	11	12	11	12	12	12	9	12	11	12	11	12	11	12	12	12	9
Квалификация работника	2	2	2	2	4	2	2	3	2	10	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	6
Оснащенность рабочего места	6	5	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	5	6	5	6	3	6	6	6	5
Выполнение производственных операций согласно требованиям	4	4	4	4	2	3	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	4	4	4	8
Прохождение инструктажей и переподготовки работника	7	7	8	5	7	8	10	7	10	7	7	7	7	7	7	9	8	7	5	7	4
Соблюдение порядка и дисциплины	3	3	3	3	3	4	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	4	3	3	3	12
Регулярность мониторинга	8	8	7	9	8	7	8	8	8	11	8	8	9	8	8	8	7	8	8	10	2

Рис. 2. Матрица оценки параметров безопасности рабочего места

Ключевым результатом методики экспертных оценок является коэффициент конкордации Кэндалла, оценивающий согласованность экспертной группы:

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \;, \tag{1}$$

где W — коэффициент конкордации, m — число экспертов, n — количество параметров, S — сумма квадратов отклонений сумм рангов, полученных каждым параметром, от средней суммы рангов.

Сумма квадратов отклонений рангов S рассчитывается по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^{n} D_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (d_i - \overline{d})_i^2 \;, \tag{2}$$

где D_i — отклонение ранга, i — порядковый номер параметра, d_i — ранг параметра, $\overline{d}$ — среднее арифметическое ранга параметра.

Коэффициент конкордации изменяется в диапазоне от 0 до 1: 0 соответствует полной несогласованности экспертов, 1 — полной согласованности. Если коэффициент конкордации равен нулю, необходимо проверить исходные данные и (или) проанализировать состав экспертов с целью их замены (частичной или полной). Если значение коэффициента превосходит 0,4–0,5, качество оценки считается удовлетворительным, если достигает 0,7–0,8 — высоким.

Таким образом, при расчете коэффициента конкордации по формулам (1) и (2) получим следующие значения параметров:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (d_i - \overline{d})^2 = 5476 + 2916 + \ldots + 361 = 39142 \,,$$

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2 \cdot (n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 39142}{21^2 \cdot (11^3 - 11)} = 0{,}806 \;.$$

С помощью критерия Пирсона «хи-квадрат» [12] проверяется нулевая гипотеза h_0: $W = 0$ (мнения экспертов не согласуются друг с другом), при альтернативной h_1: $W \neq 0$ (мнения экспертов согласуются друг с другом).

В расчетную табл. 1 вносим экспертные оценки, ранговые суммы d_i, отклонения D_i суммы рангов от средней $\overline{d}$ и D_i^2.

Таблица 1

Расчет коэффициента конкордации

Эксперты																						$d_i=\sum_{j=1}^{m} R_{ij}$	D_i	D_i^2
Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21			
1	11	10	11	11	12	11	12	10	11	8	11	10	10	11	12	11	10	11	10	11	7	221	74	5476
2	10	11	12	10	9	10	7	9	7	5	10	11	12	10	10	7	12	10	11	8	10	201	54	2916
3	9	9	9	8	10	9	9	11	9	9	12	9	8	9	9	10	9	9	9	9	11	196	49	2401
4	5	6	5	7	5	5	6	5	5	2	5	5	6	4	6	5	6	5	7	5	3	108	–39	1521
5	12	12	10	12	11	12	11	12	12	12	9	12	11	12	11	12	11	12	12	12	9	239	92	8464
6	2	2	2	2	4	2	2	3	2	10	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	6	58	–89	7921
7	6	5	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	5	6	5	6	3	6	6	6	5	118	–29	841
8	4	4	4	4	2	3	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	5	4	4	4	8	87	–60	3600
9	7	7	8	5	7	8	10	7	10	7	7	7	7	7	7	9	8	7	5	7	4	151	4	16
10	3	3	3	3	3	4	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	4	3	3	3	12	72	–75	5625
11	8	8	7	9	8	7	8	8	8	11	8	8	9	8	8	8	7	8	8	10	2	166	19	361
																						1617		39142

Средняя сумма рангов всех параметров равна $\overline{d} = \frac{\sum_{j=1}^{m} R_{ij}}{n} = \frac{1617}{11} = 147$.

В качестве контроля вычислений используем выражение $\overline{d} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (n+1) = \frac{1}{2} \cdot 21 \cdot (11+1) = 147$.

Для проверки нулевой гипотезы с помощью критерия Пирсона «хи-квадрат» вычисляем эмпирическое значение $\chi^2 = m \cdot (n-1) \cdot W = 21 \cdot 10 \cdot 0,806 = 169,4$, которое сравниваем с критическими значениями «хи-квадрат» для числа степеней свободы $n-1=10$.

Эмпирическое значение $\chi^2 = 169,4$ попадает в критическую область $\chi^2 > \chi^2_{0,01}(n-1)$ ($169,4 > 23,2$), что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу. Коэффициент конкордации значимо отличается от нуля, следовательно, имеется достаточно тесная согласованность мнений экспертов относительно оцениваемых параметров.

Результаты исследования. ЭС разрабатывается в три этапа: моделирование, проектирование, конструирование [13]. На этапе моделирования проводится анализ предметной области с целью выявления наиболее существенных связей и отношений между объектами, определяются совокупности входных и выходных параметров, степень их влияния на исследуемые процессы. Для построения математической модели ЭС «СТРАЖ» выявлены параметры безопасности рабочих мест машиностроительных производств. При оценке параметров безопасности возникла необходимость отбора экспертов-практиков, максимально осведомленных об организации технологических процессов в машиностроении, поскольку нет методик, позволяющих гарантированно получить однозначные оценки безопасности. В качестве экспертов выбрали инженеров по охране труда ведущих предприятий машиностроения Ростовской области, а также ведущих преподавателей кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета.

Обсуждение и заключения. По данным представленного исследования, коэффициент конкордации достиг 0,806. Это свидетельствует о высокой согласованности мнений экспертов, подтверждено проверкой по критерию Пирсона и является необходимым условием для разработки модели ЭС высокой точности.

В современной науке значимое место занимает проблема поддержки принятия решений с использованием ЭС. Внедрение подобных систем в машиностроении позволит:
— сократить время решения сложных вопросов, связанных с обеспечением безопасности;
— снизить вероятность принятия ложного решения;
— повысить уровень безопасности труда.

Актуально изучение данного вопроса в условиях современного инновационного производства.

Библиографический список

1. Cook, D. Smart Environments. Technologies, protocols and applications / D. Cook, S. Das // Hoboken : Wiley–Interscience, 2005. — P. 3.

2. Семенов, И. О. Актуальность экспертных систем и их значение в экономике [Электронный ресурс] / И. О. Семенов, Т. А. Серебрякова // Студенческий форум — 2018. — № 3 (24). — URL : https://nauchforum.ru/journal/stud/24/31118 (дата обращения : 07.05.2019).

3. Рутковский, Л. Методы и технологии искусственного интеллекта / Л. Рутковский. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2010. — 520 с.

4. Уотермен, Д. Руководство по экспертным системам / Д. Уотермен. — Москва : Мир, 1989. — 388 с.

5. Giarratano, J. Expert Systems — Principles and Programming / J. Giarratano, G. Riley. — 4th ed. — San Francisco : Course Technology, 2004. — 302 p.

6. Математическое моделирование пожарной безопасности высших учебных заведений / В. Г. Шаптала, В. Н. Шульженко, В. Ю. Радоуцкий, В. В. Шаптала // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2008. — № 4. — С. 63–65.

7. Попов, Э. В. Системы общения и экспертные системы / Э. В. Попов. — Москва : Радио и связь, 1990. — 464 с.

8. Мокану, А. А. Применение экспертных систем в машиностроении [Электронный ресурс] / А. А. Мокану, Е. С. Страмцова, Р. А. Пушина // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сб. ст. по мат. LXV междунар. студ. науч.-практ. конф. — URL : https://sibac.info/archive/technic/5(64).pdf (дата обращения : 13.05.2019).

9. Сапожников, А. Ю. Применение экспертных систем в процессе проектирования авиационных ГТД [Электронный ресурс] / А. Ю. Сапожников, И. А. Кривошеев // Молодой ученый. — 2017. — № 12. — 90–97 с. — URL : https://moluch.ru/archive/12/972/ (дата обращения : 12.05.2019).

10. Cross, T. B. Knowledge Engineering 2016 The Uses of Artificial Intelligence in Business / T. B. Cross. — Boulder : TECHtionary Corporation, 2016. — 236 p.

11. Литвак, Б. Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. — 2-е изд., стер. — Москва : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. — 223 с.

12. Харченко, М. А. Корреляционный анализ / М. А. Харченко. — Воронеж : ВГУ, 2008. — 30 с.

13. Солонщиков, П. Н. Интегральная оценка тяжести труда, как один из методов прогнозирования несчастных случаев на предприятии / П. Н. Солонщиков // Advanced Science. — 2017. — № 2. — С. 35.

Поступила в редакцию 14.01.2020
Запланирована в номер 06.03.2020

Об авторах:

Захарова Ольга Алексеевна, доцент кафедры «Информационные технологии», заместитель начальника управления цифровых образовательных технологий ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат педагогических наук, доцент, ORCID: https://orcid.org/0000–0001–6240–3268, Oz64@mail.ru

Селихина Александра Викторовна, аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000–0002–6486–7792, Selihina90@mail.ru.

Везиров Тимур Гаджиевич, профессор кафедры «Информационные технологии и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства» (367008, РФ, г. Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5), доктор педагогических наук, ORCID: https://orcid.org/0000–0003–4592–8462, timur.60@mail.ru.

Заявленный вклад соавторов

Т. Г. Везиров — выбор и обоснование параметров безопасности — 20 %; О. А. Захарова — постановка задачи, методика исследований, трактовка результатов исследования — 40 %; А. В. Селихина — исследование предметной области, проведение исследования, обработка результатов — 40 %.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 106–111. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 106–111. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 621.75.04 / УДК 621.91.04 / 004.9 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-106-111

Разграничение понятий «структурно-функционально-параметрическая модель» и «параметрическая модель» информационных объектов знаний



Е. Н. Колыбенко
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Рассмотрены принципиально важные проблемы отображения и преобразования структуры, функций и параметров различных свойств в системах организации информационных объектов знаний, а также функционально различных параметров в процессах управления преобразованиями материальных объектов. Для этого используются соответственно структурно-функционально-параметрические модели и параметрические модели. Разграничение этих понятий актуально и практически значимо. Научная новизна представленной работы заключается в изучении методов и информационных средств, используемых для определения функционально различных технологических схем взаимодействия объектов стадий конструкторской и технологической подготовки производства.
Материалы и методы. Понятие «структурно-функционально-параметрическая модель» связано с определением структуры основных базовых объектов знаний предметной области. В данном случае «связующая база» — это методы и соответствующие средства системной инженерии в технологии информационного логического моделирования, которые используются для решения практических задач. Понятие «параметрическая модель» связано с решением практических задач управления технологическими процессами. Природа этих задач функционально различна (техническая, физическая, химическая, биологическая). Следует уточнить также, что в данном случае речь идет о преобразовании параметров различных свойств реальных объектов методами и средствами системотехники (практически математического аппарата).
Результаты исследования. «Структурно-функционально-параметрическая модель» и «параметрическая модель» — это концептуальные общетеоретические понятия, обладающие инвариантными свойствами, необходимыми для решения практических задач предметной области знаний. Рассматривая с этой точки зрения систему организации и процессы управления, отметим, что следует поддерживать информационные и логические связи между ними в условиях статической и динамической настройки.
Обсуждение и заключения. Для решения практических задач в предметной области знаний по технологии информационного логического моделирования применяются определенные методы, средства, алгоритмы и операции. Наиболее полное отображение и преобразование информационных объектов возможно только в структурно-функционально-параметрических моделях и базах данных их решений. Использование структурно-функционально-параметрических моделей — важнейшее условие успешного перехода к высокоуровневой детерминированной автоматизации информационной технологии для решения практических задач предметной области. В качестве примера такой задачи можно привести техническую подготовку механообрабатывающего производства.

Ключевые слова: техническая подготовка производства, обработка резанием, системный анализ, информационная технология, моделирование решений, системотехника.

Для цитирования: Колыбенко, Е. Н. Разграничение понятий «структурно-функционально-параметрическая модель» и «параметрическая модель» информационных объектов знаний / Е. Н. Колыбенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 106−111. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-106-111

Distinction between concepts of "structural-functional-parametric model" and "parametric model" of information knowledge objects

E. N. Kolybenko
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. Fundamentally important problems of the structure mapping and transformation, functions and parameters of various properties in the systems of information knowledge objects organization, as well as functionally different parameters in the management processes of transformations of material objects, are considered. For this purpose, structural-functional-parametric models and parametric models are respectively used. The distinction between these concepts is relevant and practically significant. The scientific novelty of the presented work involves studying methods and information tools used to determine functionally different technological schemes for the interaction of objects at the stages of design and pre-processing engineering.
Materials and Methods. The concept of a "structural-functional-parametric model" is associated with the definition of the structure of the basic knowledge objects of the subject area. In this case, the "linking base" is the methods and corresponding means of system engineering in the infological modeling technology that are used to solve practical problems. The concept of a "parametric model" is associated with the solution to practical problems of the process control. Nature of these tasks is functionally different (technical, physical, chemical, biological). It should also be clarified that, in this case, we are talking about converting the parameters of various properties of real objects by methods and means of system engineering (almost a mathematical apparatus).
Results. A "structural-functional-parametric model" and a "parametric model" are general theoretical concepts that have invariant properties necessary for solving practical problems of the subject knowledge area. Considering the organization system and management processes in this way, note that it is required to maintain data and logical connections between them under static and dynamic settings.
Discussion and Conclusions. To solve practical problems in the subject knowledge area according to the technology of information logical modeling, certain methods, tools, algorithms, and operations are used. The most complete mapping and transformation of information objects is possible only in structural-functional-parametric models and databases of their solutions. The application of structural-functional-parametric models is the most important condition for a successful transition to a high-level deterministic automation of information technology for solving practical problems of the subject area. As an example of such a problem, we can cite the machining production design engineering.

Keywords: production design engineering, cutting, system analysis, information technology, decision modeling, system technique.

For citation: E. N. Kolybenko. Distinction between concepts of "structural-functional-parametric model" and "parametric model" of information knowledge objects. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 106−111. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-106-111

Введение. Развитие системной инженерии позволяет разграничить понятия «параметрическая модель» и «структурно-функционально-параметрическая модель» с учетом свойств понятий «математическое моделирование» и «логическое моделирование», а также функций их знаний [1, 2]. Технология системной инженерии для определения структурно-функционально-параметрической модели основана на формализации знаний предметной области. Формализованные понятия встраиваются сначала в структуру основных базовых объектов знаний, а затем в структуру базовых объектов знаний более высокого уровня предметной области. При этом семантические и синтаксические свойства понятий [3] должны быть максимально строгими. Принципиально важна в данном случае авторская актуализированная трактовка существующих и новых понятий. Под актуализацией понимают активизацию, инициализацию смысла переводом из статического (неактуального) состояния в динамическое (актуальное) с сохранением всех необходимых связей и отношений внутри системы и с внешней средой. Такой подход к формализации знаний предметной области обеспечивает ее перевод на более высокий уровень организации.

Введем актуализированное понятие «системные принципы». Это информационные логические утверждения подхода к решению задач исследования технологических систем и процессов функционально различного назначения. Данные принципы проверяются множественной практикой их использования в условиях настройки (статической — для систем и динамической — для процессов).

Материалы и методы. Сформулируем системные принципы.

1. Исследуются информационные структурно-функционально-параметрические и параметрические модели. Разграничение основано на двух системных принципах:

— единство и общность,

— различие.

Сравним структурно-функционально-параметрические модели информационных объектов и параметрические модели реальных объектов.

Их единство и общность проявляются в функциях назначения при компьютерной обработке информации: отображение, преобразование, хранение, передача.

Различие проявляется в методах и средствах решения практических задач предметной области, определенных в рассматриваемых моделях.

Технологии определения структурно-функционально-параметрических моделей реализуются методами и средствами системной инженерии: теории систем, системного анализа принятия решений, теории множеств, теории графов.

Теория множеств задействует графические средства: формализованные обозначения понятий, логические операторы для высказывания утверждений наложением связей между формализованными понятиями.

Теория графов выявляет наложения, пересечения и объединения связей между функционально едиными элементами структуры объектов по семантическим и синтаксическим свойствам используемых формализованных понятий. С этой целью применяются графы структуры и диаграммы Венна.

Для определения алгоритмов в технологии моделирования систем организации информационных объектов используются концептуальные понятия: отображение, преобразование, структура, множество и др.

В практике решения задач широко распространены технологии системной инженерии. Они используются при обработке информации на компьютерах и серверах (то есть в системах компьютеров), а также в управлении функционально различными системами организации.

В [4] технология системной инженерии представлена как технология системотехники. Это существенно сужает области ее применения. Можно рекомендовать работу [5] для ознакомления с методологией системной инженерии в информационной технологии определения крупных, сложно организованных систем высокого уровня автоматизации при решении практических задач.

Технологии системотехники реализуются различными математическими методами и средствами. С их помощью определяются параметрические модели на основе отображения и преобразования параметров различных свойств реальных объектов. В параметрических моделях математически моделируются технологические процессы управления преобразованиями реальных объектов в пределах соответствующих систем организации предметной области.

Авторы работы [6] исследуют решение задач практики технологической подготовки механообрабатывающего производства. Здесь же приводится пример существенных сложностей, которые возникают при реализации данной задачи современными средствами математического аппарата на недостаточно формализованной справочной основе знаний.

В [7] освещается практика успешной реализации технологии системной инженерии в функционально различном менеджменте. В работах [8–13] рассматриваются различные подходы к технологии системотехники для решения задач управления средствами математического аппарата. Непосредственное отношение к решению задач практики технологической подготовки производства имеют работы [14–15], позволяющие определить состояние ее знаний.

Целевые свойства понятия «структурно-функционально-параметрическая модель» и функции знаний, следующие из его формулирования. В дальнейшем изложении материала используем актуализированные понятия, введенные в [1]:

— структура,

— основные элементы (интеграции, дезинтеграции) структуры,

— проектное качество основных элементов (интеграции, дезинтеграции) в структуре объектов {детали} стадии КПП и структуре объектов {исходные заготовки} стадии ТПП (ОП),

— базовый объект знаний,

— информационный «ведомый» (основной) объект преобразования (ОП).

Понятие «структура» рассмотрим в различных аспектах на примере технологической подготовки механообрабатывающего производства.

Введем формализованные обозначения понятий:

— КПП — стадия конструкторской подготовки производства,

— ТПП (ОП) — стадия технологической подготовки производства резанием,

— {…} — множество.

1. Учтем известное суждение: «Материал видит всякий, содержание находит лишь тот, кто имеет с ним нечто общее, а форма остается тайной для большинства… Форму нужно так же хорошо переварить, как материал, но переварить ее много труднее»[1].

Между элементами знаний в триаде познания должна соблюдаться последовательность их связи (материал $\Rightarrow$ содержание $\Rightarrow$ форма), так как содержание может меняться в зависимости от восприятия материала, а для одного и того же содержания может меняться форма его отображения.

В большинстве случаев знания развиваются за счет преобразования формы их отображения, которая определяет уровень достижения их глубины и меняется соответственно. Необходимое условие перехода от содержания знаний к форме их отображения — достижение определенного уровня объединения понятий в систему.

2. Единая среда одного уровня элементов структуры «ведомого» объекта преобразования в общем случае взаимодействует (сопряжена) с группой элементов структуры «ведущего» объекта. Это взаимодействие обеспечивается наложением функционально различных связей по «опорным» точкам сопряжения со стороны элементов структуры «ведущего» объекта на элементы в структуре систем координат «ведомого» объекта. Именно на этой координации основаны структурно-функционально-параметрические модели.

3. Сопряжение «ведомого» и «ведущего» объектов взаимодействия позволяет для определения понятия «структура» основных базовых объектов знаний ввести понятия:

— состав элементов структуры,
— вид рабочей (функциональной) связи,
— метод наложения связи,
— функции рабочих связей,
— параметры свойств элементов структуры и связей между ними.

4. В основу сопряжения объектов положен системный принцип, сформулированный в [16]: «Наибольшую информацию о множествах несут границы их сопряжения». Элементы структуры каждого из объектов взаимодействия, определяемые по границам их сопряжения, — функционально новые. При этом решаются задачи определения положения элементов в системе координат «ведомого» объекта. Такое сопряжение объектов используется для определения структуры основных базовых объектов знаний какой-либо предметной области.

5. Существование структуры основных базовых объектов знаний обеспечивают только те исходные (ранее определенные) и полученные новые понятия, которые могут быть определены как формализованные (символические свойства понятий [3]), а также унифицированные аналоги элементов структуры и связей между ними, подлежащие встраиванию в структуру.

6. Основные первый и второй базовые объекты знаний первого типа стадии ТПП (ОП) определяем в соответствующих двух технологических схемах взаимодействия «ведомых» объектов по исполняемым ими рабочим функциям (базирование, геометрическое формообразование элемента формы).

7. Основной базовый объект знаний четвертого типа стадии КПП определяем по типу основного первого базового объекта знаний первого типа стадии ТПП (ОП) в соответствующей технологической схеме взаимодействия объектов. В структуре объектов {детали, сборочные узлы} стадии КПП возможно определение еще трех «ведомых» объектов по исполняемым ими рабочим функциям (базирование, направляющие, передача крутящего момента, деление и фиксация) [17].

8. Научная новизна представленной работы заключается в изучении методов и информационных средств, используемых для определения функционально различных технологических схем взаимодействия объектов стадий ТПП (ОП) и КПП.

9. Информационная технология автоматизированного решения задач ТПП (ОП) предполагает соблюдение важнейшего условия — определение двух «ведомых» объектов преобразования как составных частей в структуре объектов {исходные заготовки, заготовки} стадии ТПП (ОП) и в общем случае четырех «ведомых» объектов преобразования как составной части в структуре объектов {детали, сборочные узлы} стадии КПП.

10. Информация моделей основных базовых объектов знаний ТПП (ОП) распределена в двух частях: инвариантной и типовой объектно-ориентированной параметрической. Они логически едины и не могут рассматриваться раздельно.

Инвариантные части структуры информационных моделей основных базовых объектов знаний стадии ТПП (ОП) предназначены для решения задач оптимизации материальных и трудовых ресурсов в основных и вспомогательных технологических операциях. Типовые объектно-ориентированные параметрические части этих

[1] Гете И. В. Об искусстве. М., 1975. 623 с.

основных базовых объектов знаний служат основой для определения базовых объектов знаний более высокого уровня предметной области ТПП (ОП).

Типовые объектно-ориентированные параметрические части структуры информационных моделей базовых объектов знаний всех типов предназначены для решения задач безусловного обеспечения проектного качества основным элементам (интеграции, дезинтеграции) структуры «ведомых» объектов преобразования.

11. Каждая из двух частей в структуре информационных моделей основных базовых объектов знаний определена по форме отображения (графическая в двухмерном пространстве, соответствующая аналитическая в трехмерном пространстве). Это обеспечивает условия для автоматизированного преобразования формы их отображения из одного вида в соответствующий другой и обратно.

12. Содержание и форму информации базового объекта знаний можно определить на основе его структурно-функционально-параметрической информационной модели для отображения и преобразования алгоритма в технологии решения практических задач предметной области знаний с входа на выход при компьютерной обработке. Такая информация является совершенной.

13. Основные базовые объекты знаний (четвертого типа стадии КПП, первого и второго типов стадии ТПП (ОП)) составляют системную основу иерархической структуры базы знаний стадии ТПП (ОП) по семи уровням классификации ее базовых объектов различных типов. Базовые объекты знаний всех типов определены в контурах цепей связей элементов их структуры по функциям наложения (отношений, связей) элементов структуры в совокупности информационно и логически связанных систем координат. Основу структуры базы знаний стадии ТПП (ОП) составляют элементарные и составные налагаемые простые и сложные функционально различные {элементы геометрической формы}. Эти {элементы формы} используются первично для определения элементов в структуре группы объектов взаимодействия функционально различных технологических схем и вторично — для определения элементов в структуре основных базовых объектов знаний первого и второго типа стадии ТПП (ОП), а также четвертого типа стадии КПП. Первый базовый объект знаний первого типа стадии — {технологические схемы базирования} на их возможном множестве для исполнения функций базирования объектов производства и режущих инструментов в технологические приспособления, а также приспособлений — в соответствующие рабочие органы машины для обработки резанием. Второй базовый объект знаний первого типа — {технологические схемы базирования элементов формы в рабочие машины и геометрического образования резанием элементов формы на рабочих машинах} на их возможном множестве. Базовый объект знаний второго типа — {рабочие машины} как информационная и логическая связка первого базового объекта знаний первого типа в общем случае с ограниченным необходимым множеством вторых базовых объектов знания первого типа. Базовый объект знаний третьего типа — {системы рабочих машин} как информационная и логическая связка базового объекта знаний четвертого типа стадии КПП в общем случае с ограниченным необходимым множеством информационно и логически связанных базовых объектов знаний второго типа стадии ТПП (ОП). Базовый объект знаний четвертого типа стадии КПП — {технологические схемы базирования} на их возможном множестве для исполнения функций базирования деталей и сборочных узлов в изделия конструирования. Базовый объект знаний пятого типа стадии КПП — {изделия конструирования}.

Результаты исследования. В представленной работе структурно-функционально-параметрические модели функционально различных типов использованы для определения иерархической структуры базы знаний стадии ТПП (ОП) по семи уровням. Структура иерархической базы знаний ТПП (ОП) определена по результатам обширной практики сотрудничества с предприятиями металлообработки. Это наиболее полная структура по составу элементов и связей между ними. Она обладает инвариантными свойствами относительно возможного множества предметных областей знаний для ее распространения, например, на давление, сварку, компьютерную обработку информации, менеджмент.

Обсуждение и заключения. Иерархическая структура базы знаний предметной области ТПП (ОП) основана на:

— структурно-функционально-параметрических моделях основных базовых объектов знаний различных типов;

— базах данных, сформированных на возможном множестве решений моделей.

По уровням структуры базы знаний распределены базовые объекты знаний всех типов. Эти объекты связаны органическим единством параметров проектного качества основных элементов (интеграции, дезинтеграции) их структуры [1], что делает невозможным их раздельное рассмотрение.

Решение практических задач в инвариантных частях структуры информационных моделей для основных базовых объектов знаний позволяет адекватно рассчитать материальные и трудовые ресурсы, необходимые для оптимизации проектирования и организации подетально-кооперированного производства.

Решение практических задач в типовых объектно-ориентированных параметрических частях структуры для информационных моделей базовых объектов знаний всех типов позволяет обеспечивать проектное качество основных элементов (интеграции, дезинтеграции) структуры «ведомых» объектов преобразования.

Библиографический список

1. Колыбенко, Е. Н. Разграничение понятий математического и логического моделирования / Е. Н. Колыбенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2019. — Т. 19, № 3. — С. 262–267. DOI: https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-3-262-267

2. Колыбенко, Е. Н. Функционально различные аспекты технологии системной инженерии в познании базы знаний предметной области в примере технологической подготовки механообрабатывающего производства / Е. Н. Колыбенко, А. А. Мордовцев // Системный анализ в проектировании и управлении : сб. науч. тр. XXIII Междунар. науч.-прак. конф. — Санкт-Петербург : Изд-во СПб. гос. политехн. ун-та. — 2019. — Т. 3. — С. 281–293.

3. Устенко, А. С. Основы математического моделирования и алгоритмизации процессов функционирования сложных систем / А. С. Устенко. — Москва : БИНОМ, 2000. — 235 с.

4. Гуд, Г. Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г. Х. Гуд, Р. Э. Макол. — Москва : Советское радио, 1962. — 383 с.

5. Hall, A. D. A methodology for systems engineering / A. D. Hall. — New York : Van Nostrand, 1962. — 478 p.

6. Митин, С. Г. Проектирование операций со сложной структурой в многономенклатурных механообрабатывающих системах / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев. — Саратов : Саратовский гос. техн. ун-т им. Ю. А. Гагарина, 2016. — 108 с.

7. Икуджиро, Н. Компания — создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / Н. Икуджиро, Т. Хиротака. — Москва : Олимп-Бизнес, 2011. — 384 с.

8. Моделирование систем / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 440 с.

9. Маликов, Р. Ф. Основы разработки компьютерных моделей сложных систем / Р. Ф. Маликов. — Уфа : Изд-во БГПУ, 2012. — 256 с.

10. Девятков, В. В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития / В. В. Девятков. — Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2013. — 448 с.

11. Чикуров, Н. Г. Моделирование систем / Н. Г. Чикуров. — Москва : РИОР : ИНФРА-М, 2013. — 398 с.

12. Ghallab, Malik. Automated Planning and Acting / M. Ghallab, D. Nau, P. Traverso. — Cambridge : Cambridge UIniversity Press, 2016. — 354 p. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9781139583923

13. Caillaud, E. Research methodology for systems engineering: some recommendations [Электронный ресурс] / E. Caillaud, B. Rose, V. Goepp // IFAC-Papers OnLine : [сайт]. — 2016. — 49–12. — P. 1567–1572. — URL: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405896316310850?token=081F668FA42CD690B2813FD064DE507C747C207F28E3BA31745AA02DB655CF7CEC0059E433B5D4427AC71CE085842B4F (дата обращения : 20.01.2020).

14. Безъязычный, В. Ф. Основные понятия и положения в технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный, А. Г. Суслов // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2018. — № 2 (80). — С. 3–9.

15. Кондаков, А. И. Системное моделирование взаимодействий в технологических средах / А. И. Кондаков, А. С. Васильев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1998. — № 4. — С. 92.

16. Тернер, Д. Вероятность, статистика и исследование операций / Д. Тернер. — Москва : Статистика, 1976. — 431 с.

17. Ракович, А. Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / А. Г. Ракович. — Минск : Наука и техника, 1985. — 285 с.

Сдана в редакцию 13.01.2020
Запланирована в номер 02.03.2020

Об авторе:

Колыбенко Евгений Николаевич, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1851-3885, e.n.kolybenko@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Над номером работали:
И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 26.03.2020,
дата выхода в свет 26.03.2020.
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,6.
Гарнитура «Times New Roman»
Тираж 1000 экз.
Заказ № 26/03
Цена свободная.

The issue is prepared by:
Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 26.03.2020,
imprint date 26.03.2020.
Format 60×84/8. C.p.sh. 22.6
Font «Times New Roman»
Circulation 1000 cop.
Order no. 26/03
Free price.

Адрес учредителя, издателя и редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,
тел. +7 (863) 2-738-372.
E-mail: vestnik@donstu.ru
http://vestnik.donstu.ru/

Founder's, publisher's and printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia.
Phone: +7 (863) 2-738-372
E-mail: vestnik@donstu.ru
http://vestnik.donstu.ru/